

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Frederico Lutckmeier Streit**

**RESÍDUOS DE CONCRETO COM FIBRA DE  
POLIPROPILENO: ESTUDO SOBRE A SUA UTILIZAÇÃO  
COMO AGREGADO GRAÚDO NA CONFECÇÃO DE  
CONCRETO**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**FREDERICO LUTCKMEIER STREIT**

**RESÍDUOS DE CONCRETO COM FIBRA DE  
POLIPROPILENO: ESTUDO SOBRE A SUA UTILIZAÇÃO  
COMO AGREGADO GRAÚDO NA CONFECÇÃO DE  
CONCRETO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Coorientadora: Cristina Vitorino da Silva**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**FREDERICO LUTCKMEIER STREIT**

**RESÍDUOS DE CONCRETO COM FIBRA DE  
POLIPROPILENO: ESTUDO SOBRE A SUA UTILIZAÇÃO  
COMO AGREGADO GRAÚDO NA CONFECÇÃO DE  
CONCRETO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 8 de dezembro de 2014

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Eng. Cristina Vitorino da Silva  
Me. Pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Marlova Kulakowski (UNISINOS)**  
Dra. pelo PPGEM/UFRGS

**Profa. Àguida Gomes de Abreu**  
Dra. pelo PPGEC/UFRGS

**Profa. Cristina Vitorino da Silva (URI)**  
Me. pelo PPGEC/UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, José e Beatriz, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais José Darci Streit e Beatriz Terezinha Lutckmeier Streit pelo apoio incondicional em todos os momentos e que, com muito amor, me ensinaram a ter forças para atingir meus objetivos.

Agradeço à Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin, orientadora deste trabalho, pela oportunidade de realização desta pesquisa e por toda ajuda e empenho despendido durante a sua execução.

Agradeço à Cristina Vitorino da Silva, coorientadora deste trabalho, por toda ajuda e disponibilidade em solucionar minhas dúvidas e passar o conhecimento necessário.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pela dedicação despendida e pelas críticas e sugestões que me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos laboratoristas do LMC/UNISINOS por todo auxílio e motivação em ajudar.

Agradeço a todos que, de alguma forma, me auxiliaram na execução deste trabalho.

Não há maior sinal de loucura do que fazer sempre a mesma coisa e esperar que os resultados sejam diferentes.

*Albert Einstein*

## RESUMO

Este trabalho trata sobre a reutilização de resíduos de concreto com fibra de polipropileno, provenientes da fabricação de celas de presídios. Por conter estas fibras, o concreto excedente não pode ser descartado legalmente em aterros, gerando uma enorme quantidade de resíduos sem destinação, e que, até o momento, estão sendo estocados no terreno do fabricante das celas. Para reduzir o impacto ambiental gerado, este trabalho estuda a viabilidade de reciclar os resíduos através da utilização destes como agregado graúdo em um novo concreto, do ponto de vista da durabilidade. Para isto, foram feitas análises em corpos de prova de concreto moldados com diferentes teores de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado. Os teores de substituição escolhidos foram de 0%, 25%, 50% e 75%, sendo que para cada um deles havia três traços de relação entre cimento e agregados: 1:3,5 ( $f_{cm}$  médio de 42 MPa,  $a/c = 0,4$ ), 1:5 ( $f_{cm}$  médio de 34 MPa,  $a/c = 0,5$ ) e 1:6,5 ( $f_{cm}$  médio de 25 MPa,  $a/c = 0,6$ ). Os ensaios realizados foram de carbonatação acelerada, difusão por cloretos e absorção por capilaridade, sendo possível observar uma diferença visível nos resultados. No ensaio de penetração de cloretos, verificou-se, para os três traços, um padrão comportamental de aumento da penetrabilidade com o acréscimo do teor de substituição do agregado graúdo, chegando a 77,3% o valor médio nos concretos com teor máximo de substituição quando comparados ao concreto referência. No ensaio de absorção capilar também se observou um padrão de acréscimo da absorção do concreto com o aumento do teor de resíduos, chegando a um valor médio de 36% na absorção do concreto com maior teor de substituição quando comparado ao concreto referência. Já no ensaio de carbonatação acelerada não foi possível verificar um padrão comportamental entre os diferentes teores de agregado graúdo reciclado. Em se tratando do traço do concreto, foi possível verificar um aumento da profundidade de carbonatação na medida em que se aumenta a relação  $a/c$ , não havendo carbonatação no concreto de traço 1:3,5.

Palavras-chave: Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição. Durabilidade do Concreto. Concreto com Agregado Graúdo Reciclado.  
Resíduos de Concreto com Fibra de Polipropileno

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho.....	16
Figura 2 – Processo de carbonatação em concreto armado.....	39
Figura 3 – Mecanismos de despassivação e corrosão das armaduras.....	40
Figura 4 – Zonas de degradação do concreto armado em ambiente marítimo.....	41
Figura 5 – Diagrama esquemático do programa experimental.....	43
Figura 6 – Fatores controláveis.....	44
Figura 7 – Variáveis de resposta.....	44
Figura 8 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	48
Figura 9 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.....	50
Figura 10 – Resíduo reciclado britado.....	51
Figura 11 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado.....	52
Figura 12 – Diagrama de dosagem de concreto com 75% de substituição ( $\alpha = 56\%$ ).....	54
Figura 13 – Ensaio de absorção capilar em andamento.....	57
Figura 14 – Fatias de concreto com resina passada e identificadas.....	58
Figura 15 – Croqui das ligações elétricas do ensaio de cloretos.....	59
Figura 16 – Ensaio de penetração de cloretos em andamento.....	60
Figura 17 – Concretos dentro da câmara de carbonatação.....	62
Figura 18 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:3,5 ( $a/c = 0,4$ ).....	63
Figura 19 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:5 ( $a/c = 0,5$ ).....	64
Figura 20 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:6,5 ( $a/c = 0,6$ ).....	64
Figura 21 – Efeito isolado do traço na absorção capilar.....	67
Figura 22 – Efeito isolado do teor de substituição na absorção capilar.....	68
Figura 23 – Valores médios da carga passante através de CPs no ensaio de penetração de cloretos.....	69
Figura 24 – Efeito isolado do traço na penetração de íons cloreto.....	72
Figura 25 – Efeito isolado do teor de substituição na penetração de íons cloreto.....	73
Figura 26 – Efeito combinado do traço e do teor de substituição na penetração de íons cloreto.....	74
Figura 27 – Valores médios da profundidade de carbonatação em concretos com 180 dias de cura.....	76



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de RCD gerado e reciclado na União Europeia .....	24
Tabela 2 – Matriz experimental.....	46
Tabela 3 – Granulometria e caracterização do agregado miúdo.....	48
Tabela 4 – Granulometria e caracterização do agregado graúdo natural.....	49
Tabela 5 – Granulometria e caracterização do agregado graúdo reciclado.....	51
Tabela 6 – Dados das dosagens e resistências para diferentes teores de substituição.....	55
Tabela 7 – Penetração de íons cloreto em função da carga total passante.....	61
Tabela 8 – Valores médios de absorção capilar para concreto com 90 dias de cura.....	65
Tabela 9 – Análise de variância do ensaio de absorção capilar.....	66
Tabela 10 – Valores médios de penetração para concretos com 180 dias de cura.....	70
Tabela 11 – Análise de variância do ensaio de penetração de cloretos.....	71
Tabela 12 – Valores médios de carbonatação para concretos com 180 dias de cura.....	77

## **LISTA DE SIGLAS**

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DECIV – Departamento de Engenharia Civil

EE – Escola de Engenharia

EUA – Estados Unidos da América

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR – Norma brasileira

PP – Polipropileno

PU – Poliuretano

RCD – Resíduos da Construção e Demolição

RCC – Resíduos da Construção Civil

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

URI – Universidade Regional Integrada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	13
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	13
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	13
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	13
2.3 HIPÓTESE .....	14
2.4 PRESSUPOSTO .....	14
2.5 PREMISA .....	14
2.6 DELIMITAÇÕES .....	14
2.7 LIMITAÇÕES .....	14
2.8 DELINEAMENTO .....	15
<b>3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO</b> .....	17
3.1 HISTÓRIA E DEFINIÇÃO DO RCD .....	17
3.2 GERAÇÃO DE RCD .....	19
<b>3.2.1 Resíduos de demolição</b> .....	20
<b>3.2.2 Resíduos de construção e reforma</b> .....	21
<b>3.2.3 Dados no Brasil e no mundo</b> .....	22
3.3 RECICLAGEM DE RCD .....	24
3.4 COMPOSIÇÃO DOS RCD .....	27
<b>3.4.1 Variabilidade dos RCD</b> .....	29
<b>3.4.2 Contaminação dos RCD</b> .....	30
3.5 CONCRETOS COM FIBRA DE POLIPROPILENO.....	32
3.6 RESOLUÇÃO N. 307/2002 DO CONAMA .....	32
<b>4 DURABILIDADE DO CONCRETO</b> .....	36
4.1 FATORES DE DEGRADAÇÃO MECÂNICOS E FÍSICOS.....	36
4.2 FATORES DE DEGRADAÇÃO QUÍMICOS.....	37
<b>4.2.1 Carbonatação</b> .....	38
<b>4.2.2 Cloretos</b> .....	39
<b>4.2.3 Outros elementos</b> .....	40
<b>5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	42
5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	42
<b>5.1.1 Planejamento experimental.....</b>	43

<b>5.1.2 Fatores controláveis.....</b>	<b>44</b>
<b>5.1.3 Variáveis de resposta.....</b>	<b>45</b>
5.2 MATRIZ EXPERIMENTAL.....	46
5.3 MATERIAIS UTILIZADOS .....	46
<b>5.3.1 Água .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.2 Cimento .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.3 Agregado miúdo .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.4 Agregado graúdo natural .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3.5 Agregado graúdo reciclado .....</b>	<b>50</b>
5.4 METODOLOGIA DE ENSAIOS .....	52
<b>5.4.1 Produção do concreto .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4.2 Moldagem e cura dos corpos de prova .....</b>	<b>55</b>
<b>5.4.3 Ensaio de absorção capilar .....</b>	<b>56</b>
<b>5.4.4 Ensaio de penetração de cloretos .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4.5 Ensaio de carbonatação acelerada .....</b>	<b>61</b>
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
6.1 ABSORÇÃO CAPILAR .....	63
<b>6.1.1 Efeito isolado do traço.....</b>	<b>66</b>
<b>6.1.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo.....</b>	<b>67</b>
6.2 PENETRAÇÃO DE CLORETOS .....	68
<b>6.2.1 Efeito isolado do traço.....</b>	<b>71</b>
<b>6.2.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo.....</b>	<b>72</b>
<b>6.2.3 Efeito combinado do traço e do teor de substituição.....</b>	<b>74</b>
6.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA .....	75
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>78</b>
REFERÊNCIAS .....	80
APÊNDICE A .....	83
APÊNDICE B .....	87
APÊNDICE C .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos vem crescendo cada vez mais a preocupação com o meio ambiente. Neste contexto, é bom observar que o setor da construção civil é um dos mais poluidores do mundo, gerando milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) todos os anos. Segundo Sjöström<sup>1</sup> (1996 apud JOHN, 2000, p. 15), o volume de recursos naturais utilizados pela construção civil, muitos deles não renováveis, corresponde em média a um terço do consumido anualmente por toda a sociedade.

Tendo em vista o alto consumo do setor e a grande quantidade de resíduos gerados, uma das soluções para minimizar a extração de recursos minerais naturais é reciclar os resíduos gerados e reutilizá-los. Desta forma, os RCD são britados de acordo com a granulometria necessária e usados como agregados em concretos, como bases em rodovias ou em diversas outras utilizações. O maior problema em se reciclar estes resíduos é que, por ser uma mistura de diversos materiais de construção, não se pode ter certeza sobre seu desempenho técnico. Por isto, são necessários alguns testes para verificar se os RCD em questão estão aptos a serem utilizados para o fim desejado.

Durante a produção de celas modulares de concreto para presídios, feitas por uma empresa em Canoas, no Rio Grande do Sul, uma grande quantidade de resíduos é gerada todos os meses. Na sua fabricação, são adicionadas fibras de polipropileno ao concreto para torná-lo mais resistente às fissuras, porém, com esta adição, os resíduos acabam se tornando impróprios para serem depositados em aterros sanitários. Este fato causa grande problema à empresa, que até o momento não possui soluções para o descarte deste material.

Tendo em vista os fatos citados, este trabalho visa verificar através de ensaios de durabilidade do concreto, realizados em laboratório, se o resíduo mencionado pode ser reciclado e reutilizado como agregado graúdo em concreto convencional. Caso a reutilização seja viável e comece a ser feita, esta medida reduziria bastante a quantidade de recursos minerais retirados do meio ambiente, solucionando também o problema do descarte dos resíduos.

---

<sup>1</sup> SJÖSTRÖM, C. Service life of building. In: APPLICATIONS OF THE PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDING. **Proceedings...** Tel Aviv: CIB, 1996 v. 2, p. 6-11

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: é viável tecnicamente a utilização de resíduos provenientes da produção de concreto com fibra de polipropileno, como agregado graúdo, em concreto convencional, com  $f_{cm}$  até 40 MPa?

### 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a análise técnica do uso de resíduos provenientes da produção de concreto com fibra de polipropileno, como agregado graúdo, em concreto convencional, com  $f_{cm}$  até 40 MPa.

#### 2.2.2 Objetivo secundário

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a caracterização do agregado graúdo obtido pelo reaproveitamento dos resíduos provenientes da produção de concreto com fibra de polipropileno;
- b) a análise da durabilidade do concreto através de ensaios de carbonatação, penetração por cloretos e absorção capilar do concreto com  $f_{cm}$  até 40 MPa, cujo agregado graúdo é proveniente do reaproveitamento dos resíduos da produção de concreto com fibra de polipropileno;

- c) avaliação da interação entre o teor de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado.
- d) definição do teor de substituição do agregado graúdo mais viável para cada traço de concreto.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a utilização dos resíduos gerados na produção de concreto com fibras de polipropileno, como agregado graúdo em concreto convencional, com  $f_{ck}$  até 40 MPa, é tecnicamente viável.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os procedimentos de ensaios de corpos de prova descritos na norma NBR 9779:2012 e ASTM C1202 são válidos para as definições da durabilidade do concreto analisado.

## 2.5 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que a produção de concreto com fibra de polipropileno gera grande quantidade de resíduos, que podem causar impactos ambientais caso não sejam reaproveitados.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de laboratório feitos com concreto com  $f_{ck}$  até 40 MPa, cujo agregado graúdo é proveniente da reciclagem de resíduos da fabricação de concreto com fibra de polipropileno.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os resíduos de concreto utilizados são provenientes de apenas uma empresa;
- b) os ensaios de durabilidade são feitos com corpos de prova produzidos e moldados em laboratório;
- c) são ensaiados somente concretos com substituição de 0%, 25%, 50% e 75% do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado;
- d) as resistências à compressão dos CPs utilizadas são do trabalho de Zitto (2014).

## 2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

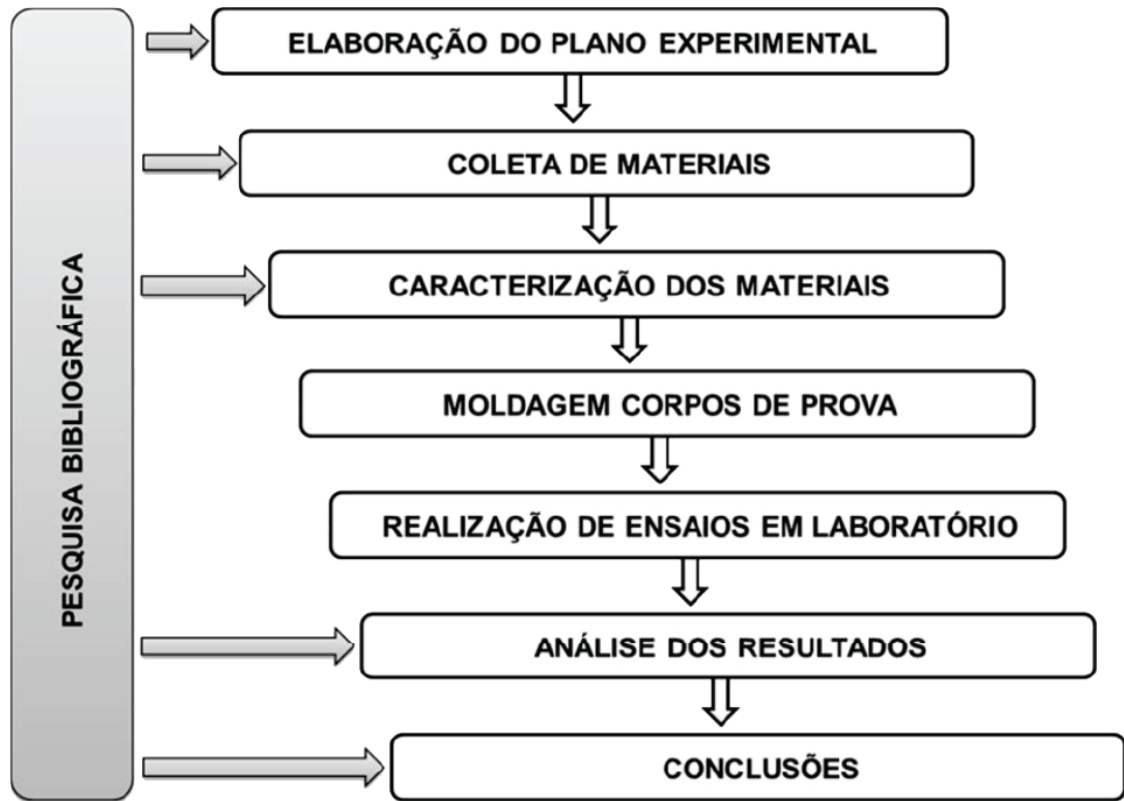
- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) coleta de materiais;
- d) caracterização dos materiais;
- e) moldagem corpos de prova;
- f) realização de ensaios em laboratório;
- g) análise dos resultados;
- h) conclusões.

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada durante todo o trabalho. Ela foi bastante utilizada para obtenção de informações sobre o assunto e como embasamento teórico dos testes realizados, além disto, foi utilizada também como auxílio para esclarecer dúvidas que surgiram ao longo do trabalho. A **elaboração do plano experimental** foi a etapa na qual foram definidos como os testes de laboratório seriam executados, assim como a quantidade de corpos de provas que deveria ser usada.

A etapa seguinte foi a de **coleta de materiais**, quando os resíduos da construção de celas modulares de concreto com fibras de polipropileno foram coletados junto à empresa fabricante. Com o material em mãos, foi dado prosseguimento ao trabalho, efetuando-se a **caracterização dos materiais**, quando alguns ensaios foram feitos para se obter melhor conhecimento sobre os resíduos coletados. Estes ensaios foram de granulometria, massa específica e permeabilidade.



Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Com o material caracterizado, foi efetuada a **moldagem dos corpos de prova**, obedecendo aos procedimentos descritos na NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Tendo sido respeitadas as datas de cura dos corpos de prova, foi feita a etapa de **realização de ensaios em laboratório**, onde os corpos de prova de concreto moldados foram testados com o intuito de analisar a sua durabilidade, através dos ensaios de absorção capilar, penetração por cloretos e carbonatação.

A etapa que se seguiu foi chamada de **análise dos resultados**, que consistia em analisar os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova juntamente com a professora orientadora Denise C. C. Dal Molin e com a professora coorientadora Cristina Vitorino, a fim de analisar os diferentes resultados obtidos em cada tipo de concreto ensaiado. Esta análise foi a base para a etapa seguinte, quando foram feitas **conclusões** sobre o trabalho, determinando se é viável tecnicamente a utilização dos resíduos reciclados e a sua influência no concreto analisado.

### 3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos básicos sobre os resíduos da construção e demolição (RCD), como sua história, definição e geração. A seguir são apresentados dados sobre a geração de resíduos e reciclagem do Brasil e do mundo. No final, são expostos alguns problemas presentes nos resíduos, como sua variabilidade e contaminação, além da Resolução n. 307/2002 do Conama, que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC).

#### 3.1 HISTÓRIA E DEFINIÇÃO DO RCD

Os RCD podem ser definidos de maneiras diferentes por cada autor, porém Vieira (2003, p. 25) simplifica definindo como “Qualquer material proveniente de atividades de demolição de obras civis, restos de obras, autoconstrução ou reformas, [...]”. Já Leite (2001, p. 11), define RCD mais simplificada como “[...] um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas.”.

Estas duas definições vão de encontro ao que é citado na norma brasileira que trata sobre a utilização de agregados reciclados de RCD em pavimentação e em concreto sem função estrutural. Nesta norma, a NBR 15116 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004b, p. 2), o RCD é definido como:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Outro tipo de definição que pode ser feita sobre estes resíduos é a partir do ponto de vista ambiental. Muitos autores utilizam a descrição da norma que trata da classificação de resíduos sólidos, a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a), para definirem o RCD como inerte na classe II B, sendo considerado como não perigoso e solubilidade de seus componentes dentro do permitido pela norma.

Porém, há tempos que esta classificação vem provocando debates entre autores sobre o assunto, pois alguns defendem que os RCD deveriam ser classificados como não inertes. Um deles é Cabral (2007, p. 52) que afirma em sua obra que estes resíduos podem estar contaminados com materiais de pintura, de tratamento de superfícies ou até mesmo metais pesados, podem contaminar a água e o solo ao serem lixiviados. Outro trabalho que classifica os RCD como II-A (não inerte) foi publicado por Brehmen et al. (2013), onde os autores comprovam através de ensaios em laboratório a solubilização de ferro e alumínio, presentes nos resíduos, acima do permitido pela norma.

Como visto, os RCD podem conter diversos materiais em sua composição que podem até inviabilizar a sua reciclagem. Este problema é abordado nos itens 3.4.1 e 3.4.2 deste trabalho.

Desde o surgimento da humanidade, há milhares de anos atrás, já se tem vestígios de construções feitas pelos homens. Estas construções eram feitas de diversos materiais, como palha, barro ou pedra e já naquela época acabavam gerando resíduos. Com o passar do tempo, houve um crescimento da população em cidades e o conseqüente aumento de edificações construídas, necessitando cada vez mais produtos minerais. Na época do Império Romano (27 a.C. – 476 d.C.), esta necessidade de agregados minerais junto com o aumento dos resíduos gerados, acabou fazendo com que os construtores da época começassem a usar os resíduos em suas novas construções (LEVY; HELENE, 1995).

Apesar de esta reutilização ser tão antiga, foi só a partir de 1928 que testes começaram a ser feitos com os resíduos para verificar a sua melhor forma de utilização. Estes testes incluíam a granulometria do agregado, consumo e absorção de água e também a melhor quantidade de cimento a ser usada. Mesmo com estes estudos, os entulhos só vieram a ser utilizados como agregados reciclados em concreto alguns anos depois, ao final da Segunda Guerra Mundial (LEVY; HELENE, 1995).

Em 1946, a Europa encontrava-se devastada pela Guerra e tinha que encontrar uma forma mais barata para se reerguer. Com a maioria das cidades em escombros, e uma grande demanda de agregados necessária para a reconstrução dos países, a melhor maneira encontrada foi a de reciclar os entulhos das edificações em ruínas e utilizá-las nas novas construções. Foi assim que se deu início à era da reciclagem de resíduos da construção civil, sendo desenvolvidas novas tecnologias e aprimoramentos até hoje (LEVY; HELENE, 1995).

### 3.2 GERAÇÃO DE RCD

O RCD pode ser proveniente de sobras de materiais dentro das obras, de demolições de prédios e outras edificações ou até mesmo de catástrofes naturais, como furacões e terremotos. Além disto, estes resíduos são gerados por todas as empresas do setor da construção civil, não importando o seu tamanho, conforme citado por Carneiro et al. (2001, p. 148):

Os resíduos de construção e demolição são gerados por diversos agentes, como empresas de construção, médios e pequenos prestadores de serviços, órgãos públicos, autoconstrutores, entre outros. Ou seja, esses resíduos são produzidos tanto pelo pequeno gerador quanto pelas indústrias da construção civil.

A quantidade de resíduos gerados nos últimos anos vem crescendo e isto se deve principalmente ao desordenado crescimento urbano, que fez com que a população urbana brasileira, por exemplo, aumentasse muito no último século, passando de 31% em 1940, para 68% em 1980 e, finalmente, para 85% em 2012 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2003, 2012). Além disto, o Brasil está passando por um crescimento econômico que, aliado a um déficit habitacional muito grande, faz com que novas construções sejam lançadas todos os dias, contribuindo com a geração de resíduos (CARNEIRO<sup>2</sup> et al., 2000 apud LEITE, 2001, p. 2).

Alguns fatores gerais interessantes sobre este assunto são levantados pelos autores Bakoss e Ravindrarah<sup>3</sup> (1999 apud CABRAL 2007, p. 54), que afirmam em sua obra que:

A geração dos resíduos de construção e demolição é influenciada por muitos e diversos fatores, onde dentre eles pode-se citar: as práticas de construção e demolição adotadas; os fatores de mercado e econômicos, tais como o tamanho do mercado, a disponibilidade e custo dos agregados naturais comparados com os custos de entrega dos agregados reciclados; a estrutura reguladora que fornece incentivos para minimizar a geração de resíduos nos canteiros de obra e desestímulos para dispor os resíduos nos aterros; as percepções com respeito à qualidade dos materiais reciclados e a ausência do uso de códigos de prática, especificações e mecanismos de garantia de qualidade.

---

<sup>2</sup> CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. Characterization of C e D waste and processed debris aiming the production of construction materials. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: CIB, 2000. 1 CD-ROM.

<sup>3</sup> BAKOSS, S. L.; RAVINDRARAJAH, R. S. **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities.** Sydney: CBIR-UTS, Feb. 1999. Scoping Report.

A geração de resíduos é exposta separadamente nos itens a seguir, mostrando as suas formas de geração e, também, seus dados no Brasil e no mundo.

### 3.2.1 Resíduos de demolição

Os resíduos provenientes de demolições na construção civil são mais difíceis de serem reduzidos justamente pela necessidade de renovação das construções. Um dos motivos citados por Levy e Helene<sup>4</sup> (2000 apud LEITE, 2001, p. 2) é que antigamente “[...] muitas estruturas de concreto foram concebidas sem o conhecimento necessário sobre a sua durabilidade. [levando] à redução da vida útil das estruturas, [...]”. Já para Bakoss e Ravindrarajah<sup>5</sup> (1999 apud CABRAL, 2007), o motivo para a enorme geração de resíduos em reformas e demolições é principalmente da falta da cultura de reutilização e reciclagem.

Uma pesquisa feita por Oikonomou<sup>6</sup> (2005 apud LOVATO, 2007, p. 26) indica alguns fatores para o aumento do volume dos resíduos vindos de demolições, que são:

- a) muitas edificações antigas e outras estruturas chegaram ao seu limite de vida útil e necessitam ser demolidas;
- b) há estruturas, que mesmo adequadas ao uso, são demolidas, pois há novas necessidades;
- c) há resíduos de edificações que são resultados de fenômenos da natureza, como terremotos e tempestades.

Para se ter uma idéia, a quantidade de resíduos de demolição gerada no setor de construção civil pode ser até maior que a de resíduos de obras. Uma pesquisa feita por Bakoss e Ravindrarajah<sup>7</sup> (1999 apud CABRAL 2007, p. 52) aponta que “[...] 55% dos resíduos produzidos por este setor na Austrália provêm de serviços de demolição enquanto que 40% provêm dos de construção.”.

---

<sup>4</sup> LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: CIB, 2000. 1CD-ROM.

<sup>5</sup> BAKOSS, S. L.; RAVINDRARAJAH, R. S. **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities**. Sydney: CBIR-UTS, Feb. 1999. Scoping Report.

<sup>6</sup> OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315-318, Feb. 2005.

### 3.2.2 Resíduos de construção e reforma

Os resíduos de construção e reforma são aqueles provenientes principalmente do desperdício de material no canteiro de obras e da sobra de material que foi mal dimensionado. O combate à sua geração é mais simples, pois não depende tanto de fatores externos como os resíduos de demolição, que na maioria das vezes são gerados a partir da necessidade de renovação das estruturas. Este desperdício é muitas vezes relacionado à baixa qualidade técnica da mão de obra presente na construção civil, em que é pouco comum achar trabalhadores com cursos de especialização nas áreas nas quais atuam. Também pode-se dizer que a tecnologia usada em países menos desenvolvidos tem certa parcela de culpa, já que possui o foco voltado somente à produção, negligenciando o desperdício ou a reciclagem de material.

Um estudo coordenado por Zveibil (2001, p. 28) e publicado pelo Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM) demonstra esta situação no País, informando que devido à tecnologia construtiva usada no país, que favorece o desperdício, faz com que a média de resíduos gerados no Brasil em novas edificações seja em torno de 300 kg/m<sup>2</sup> edificado, sendo três vezes maior que em países desenvolvidos. Estes dados demonstram que, com a tecnologia correta, a geração de resíduos poderia ser bem menor no Brasil. Segundo Souza<sup>8</sup> et al. (1999 apud CABRAL, 2007, p. 57) uma pesquisa realizada comprova este desperdício:

[...] foi realizada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), em convênio com dez universidades brasileiras, onde se determinou as perdas de alguns materiais de construção, em quase cem canteiros de obras. Os resultados apontam que, em média, 9% do concreto usinado, 17% dos blocos e tijolos, 85,5% do cimento no serviço de emboço, 79% do cimento no serviço de contrapiso, 22% das placas cerâmicas aplicadas no piso, 16% das placas cerâmicas aplicadas na parede e 12% das placas cerâmicas aplicadas na fachada são desperdiçados, [...].

Nota-se a partir destes dados que, de acordo com o serviço executado, uma parte considerável do material é desperdiçada e acaba virando entulho de obra. Estes dados vão ao encontro daquilo que foi citado por Pinto (1999, p. 34): “Perda média de materiais nos processos construtivos, em relação à massa de materiais levados ao canteiro de obra é em torno de 25%.”.

---

<sup>7</sup> BAKOSS, S. L.; RAVINDRARAJAH, R. S. **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities**. Sydney: CBIR-UTS, Feb. 1999. Scoping Report.

### 3.2.3 Dados no Brasil e no Mundo

No Brasil existem vários trabalhos e pesquisas relacionados à quantidade de RCD que é gerada todos os anos. Segundo Karpinski et al. (2009, p. 12), “A indústria da construção civil apresenta grandes volumes de materiais de construção e de atividades nos canteiros de obras, o que acaba gerando um elevado índice de resíduos produzidos nas áreas urbanas, [...]”.

Pinto<sup>9</sup> (2005 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 12) realizou estudos no estado de São Paulo e concluiu que mais da metade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é composto por RCD. Estes dados vão ao encontro do que foi publicado por Bernardes et al. (2008, p. 70), que relatam que a cidade de Passo Fundo, no RS, apresenta índices de geração de RCD de 0,55 kg/hab/dia, tendo as suas quantidades, em massa, muito parecidas com as de RSU geradas na cidade.

Pelo mundo a geração de RCD é bem conhecida, e seus problemas são constantemente discutidos, principalmente pelo setor de construção civil. Conforme Oikonomou<sup>10</sup> (2005 apud LOVATO, 2007, p. 18), “[...] o setor consome grande quantidade de recursos naturais, 40% do total de energia e gera 50% do total de resíduos produzidos no mundo.”.

Na Europa, a quantidade de RCD gerado também é muito grande, mas por outro lado, há uma maior preocupação da construção civil com a reciclagem. Um estudo que mostra isto foi realizado por Dhir<sup>11</sup> et al. (2004 apud CABRAL, 2007, p. 49), que mostra que “[...] no Reino Unido este setor produz em torno de 109 milhões de toneladas por ano, sendo que esta quantidade equivale a 66% dos 165 milhões de toneladas de agregados naturais consumidos anualmente na construção civil.”. Já outro estudo feito no mesmo País, por Barritt<sup>12</sup> (2006 apud CABRAL, 2007, p. 49), descreve a situação da reciclagem desses resíduos, apontando

---

<sup>8</sup> SOUZA, U. E. L.; AGOPYAN, V.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. Desperdício de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE DESPERDÍCIO DE MATERIAIS NOS CANTEIROS, 1., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: PCC/EPUSP, 1999. Não paginado.

<sup>9</sup> PINTO, T. P. (Coord.) **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP.** São Paulo: Obra Limpa/I e T/SindusCon-SP, 2005.

<sup>10</sup> OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315-318, Feb. 2005.

<sup>11</sup> DHIR, R. K.; PAINE, K. A.; DYER, T. D. Recycling construction and demolition wastes in concrete. **Concrete Journal**, v. 38, n. 3, p. 25-28, Mar. 2004.

<sup>12</sup> BARRITT, J. The evolution of recycled aggregates for concrete. **Concrete Engineering International**, v. 10, n. 3, p. 58-60, Autumn, 2006.

para reutilização de 25% do volume gerado, sendo dois terços destes utilizados como base ou sub-base de rodovias.

Há outro estudo sobre o velho continente que informa que “A geração de grandes volumes de resíduos de construção oriundos dos canteiros de obras, além dos materiais de demolição, é responsável por cerca de 20% a 30% do total dos resíduos gerados pelos países-membros da União Europeia.” (MURAKAMI<sup>13</sup> et al., 2002 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 25). Já um estudo publicado pelo *European Thematic Network on Recycling in Construction*<sup>14</sup> (1999 apud CABRAL, 2007, p. 54), revela que a reciclagem dos RCD na União Europeia (UE) é muito desigual, tendo países com as mais altas taxas de reciclagem do mundo, como é o caso de Holanda (90%), Bélgica (87%) e Dinamarca (81%) e outros com taxas irrisórias de menos de 5%, como é o caso de Espanha, Portugal, Grécia e Irlanda. Esta desigualdade acaba gerando uma média de 28% de reciclagem do total gerado. Os dados completos desta pesquisa estão dispostos na tabela 1.

Já na maior economia do planeta, os Estados Unidos da América (EUA), a média de reciclagem é parecida com a europeia. Segundo dados obtidos por Schneider e Philippi Jr.<sup>15</sup> (2004 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 12), das 136 milhões de toneladas de RCD produzidas anualmente, 25% do total é reciclado em uma das 3500 usinas de reciclagem existentes no País. Estes números de reciclagem estão abaixo da realidade da Austrália, onde Shayan e Xu<sup>16</sup> (2003 apud LOVATO, 2007, p. 24) mostram que “[...] são produzidos anualmente mais de três milhões de toneladas de RCD, sendo a maior parte composta por resíduos de concreto, dos quais, aproximadamente 50% é reciclado [...]”.

---

<sup>13</sup> MURAKAMI, S.; IZUMI, H.; YASHIRO, T.; ANDO, S.; HASEGAWA, T. **Sustainable building and policy design**. Tokyo: Institute of International Harmonization for Building and Housing, 2002.

<sup>14</sup> EUROPEAN THEMATIC NETWORK ON RECYCLING IN CONSTRUCTION. **An EC report on construction and demolition waste**. Combined v. 1, n.1/2, p. 9, Mar./Sept. 1999.

<sup>15</sup> SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI JR., A. Public management of construction and demolition waste in the city of São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 21-32, out./dez. 2004.

<sup>16</sup> SHAYAN, A.; XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 100, n. 5, p. 371-380, Sept./Oct. 2003.



Tabela 1 – Quantidade de RCD gerado e reciclado na União Europeia

País	RCD (Mt/ano)	% reutilizada ou reciclada
Alemanha	59	17
Reino Unido	30	45
França	24	15
Itália	20	9
Espanha	13	<5
Holanda	11	90
Bélgica	7	87
Áustria	5	41
Portugal	3	<5
Dinamarca	3	81
Grécia	2	<5
Suécia	2	21
Finlândia	1	45
Irlanda	1	<5
Luxemburgo	0	n.d.
Total Europa	181	28

(fonte: adaptado de EUROPEAN THEMATIC NETWORK ON RECYCLING IN CONSTRUCTION<sup>17</sup>, 1999 apud CABRAL, 2007, p. 54)

### 3.3 RECICLAGEM DE RCD

Conforme visto no item anterior, diversos países já reciclam grande parte dos seus resíduos da construção e demolição, porém no Brasil ainda se utiliza pouco este recurso, o que é ruim para o País. O desperdício de material no Brasil é um fato relevante e que deveria ser mais pesquisado e debatido, tanto pelo governo quanto por indústrias do setor. O custo do

<sup>17</sup> EUROPEAN THEMATIC NETWORK ON RECYCLING IN CONSTRUCTION. **An EC report on construction and demolition waste**. Combined v. 1, n.1/2, p. 9, Mar./Sept. 1999.

desperdício acaba sendo pago por todos, seja embutido nos impostos para limpeza e remoção e tratamento de resíduos ou no aumento do custo das edificações, alavancado por este desperdício (MENDES<sup>18</sup> et al., 2004 apud KARPINSKI et al., 2009).

Estes problemas podem ser perfeitamente contornados, considerando que o tipo de resíduo gerado neste setor é quase totalmente reciclável. Camargo<sup>19</sup> (1995 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 30) expõem a necessidade de reciclagem dos RCD:

A construção civil é a única indústria capaz de absorver quase que totalmente os resíduos que produz. Enquanto vários setores industriais diminuem a utilização de suas matérias-primas, a engenharia civil não pode reduzir a quantidade dos materiais necessários para edificar uma obra sem comprometer a qualidade e a durabilidade da construção. Em razão disso, é necessário encontrar alternativas para o destino dos resíduos, com formas práticas de reciclagem na própria obra ou em usinas implantadas para esse fim.

Apesar de ser possível reciclar grande parte dos RCD, há pontos que devem ser analisados antes de se implantar uma usina de reciclagem. Alguns destes pontos foram citados por John e Ângulo<sup>20</sup> (2003 apud CABRAL, 2007, p. 64) em sua pesquisa e estão descritos abaixo:

- a) o mercado de geração dos resíduos, estimando a sua geração e os custos associados aos mesmos, além de analisar o processo de gestão dos mesmos. Nessa etapa é verificada a disponibilidade e a sazonalidade dos resíduos a serem reciclados, além dos processos de transporte e estocagem, uma vez que frequentemente há misturas nessas etapas;
- b) deve-se caracterizar os resíduos, determinando suas características físicas, químicas, microestruturais e outras características que sejam consideradas relevantes;
- c) deve-se fazer uma seleção de usos potenciais para os resíduos, em função das suas características e das condições de mercado locais;
- d) deve-se selecionar alternativas com potenciais técnicos e com viabilidade de mercado para serem pesquisados, com critérios para seleção das alternativas mais promissoras;
- e) por fim, deve-se desenvolver e avaliar o produto, preferencialmente quanto ao desempenho técnico, à sustentabilidade e à viabilidade econômica.

---

<sup>18</sup> MENDES, T. A.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J. C. de; VEIGA, R. Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 35., 2004, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: [s. n], 2004. p. 1-12.

<sup>19</sup> CAMARGO, A. Minas de entulho. *Téchne: a revista do engenheiro civil*, São Paulo, v. 3, n. 15, p. 15-19, mar. 1995.

<sup>20</sup> JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: JOHN, V. M.; ROCHA, J. C. (Org.). *Utilização de resíduos na construção habitacional*. 1. ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003, p. 8-71.

O item que trata sobre o mercado de geração de resíduos é um dos mais importantes, pois as empresas estão sempre correndo atrás de maiores lucros, e do ponto de vista econômico, reciclar RCD pode ser uma escolha rentável. Carneiro et al. (2001, p. 157-158) descrevem em que casos a reciclagem é atrativa:

Na economia de mercado, a reciclagem de entulho será atrativa quando o produto reciclado apresentar qualidade e preço competitivo em relação aos materiais naturais. Essa situação ocorre em regiões próximas aos centros urbanos, onde as reservas de matérias-primas estão se esgotando, ou os custos de disposição em aterros são elevados.

Com a reciclagem do entulho, pode-se fazer economia dos custos de transporte de matérias-primas para longas distâncias, além dos custos de deposição final em aterros e transporte do entulho. [...]. Os custos relativos ao transporte do entulho ao aterro e ao fornecimento de matérias-primas podem tornar a reciclagem economicamente viável. Além disso, os eventuais custos com remediação de impactos ambientais e disposição no aterro podem aumentar ainda mais as vantagens econômicas da reciclagem.

Um exemplo da economia que pode ser gerada vem do Conselho de *Sutherland*, em Sydney, na Austrália, onde a maioria dos RCD são reciclados e reutilizados em diversas obras no local. Esta reciclagem gera uma economia em torno de US\$ 63.000 por ano, e faz com que não seja necessário comprar agregados naturais para obras como execução de calçadas e sarjetas desde 1991 (BAKOSS; RAVINDRARAJAH<sup>21</sup>, 1999 apud CABRAL, 2007, p. 65-66).

Apesar da utilização de materiais reciclados de RCD ser economicamente viável, um dos fatores responsáveis pela reciclagem ainda não ser muito utilizada no Brasil é o baixo desempenho técnico dos materiais confeccionados com adição de resíduos reciclados. Segundo Carneiro et al. (2001, p. 158), “Para utilizar resíduos como matéria-prima, em substituição aos materiais tradicionais, é necessário que esse insumo alternativo apresente padrões de desempenho compatíveis com a sua utilização.”. A causa deste baixo desempenho, e que deve ser combatida com o uso de tecnologias adequadas, é a grande variabilidade e contaminação dos resíduos, assuntos que são discutidos mais adiante.

Pelos fatos mencionados, normalmente o material reciclado é usado em locais onde não seja muito exigido estruturalmente, como na composição de vigas com baixas cargas ou até

---

<sup>21</sup> BAKOSS, S. L.; RAVINDRARAJAH, R. S. **Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities**. Sydney: CBIR-UTS, Feb. 1999. Scoping Report.

mesmo como enchimento de pisos. Abaixo são dispostas algumas das utilizações possíveis de agregados miúdos e graúdos provenientes da reciclagem de RCD, conforme Pinto<sup>22</sup> (2000 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 40-41):

- a) aterramento de valas e reconstituição de terreno;
- b) execução de estacas ou sapatas para muros com pequenas cargas;
- c) lastro e contrapiso em áreas comuns externas e passeio público;
- d) contrapiso e piso em abrigo de automóveis;
- e) contrapiso em ambientes internos nas unidades habitacionais;
- f) contrapiso ou enchimento em casa de máquinas e áreas comuns internas;
- g) sistema de drenagem em estacionamentos, poço de elevador e floreiras;
- h) vergas e pequenas colunas de concreto com baixa solicitação;
- i) assentamento de blocos e tijolos;
- j) enchimentos em geral em alvenarias, lajes desniveladas e escadarias;
- k) chumbamento de batentes, contramarcos e esquadrias;
- l) chumbamento das instalações elétricas, hidráulicas e de telefonia;
- m) revestimentos internos e externos em alvenarias.

Enquanto alguns países já se beneficiam com a utilização do RCD reciclado, gerando riquezas com resíduos que iriam para o lixo, países como o Brasil ainda possuem taxas de reciclagem muito baixas neste setor. No próximo item, é descrita a composição dos resíduos e também alguns dos problemas que afetam a reciclagem dos mesmos, como a variabilidade e a contaminação.

### 3.4 COMPOSIÇÃO DOS RCD

Os resíduos da construção podem ser compostos por diversos elementos, pois dependem muito da etapa em que a obra está obra e também de qual tipo de tecnologia está sendo executada. Estes resíduos também podem mudar sua composição de acordo com a empresa

---

<sup>22</sup> PINTO, T. de P. Reciclagem no canteiro de obras: responsabilidade ambiental e redução de custos. **Téchne**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, v. 9, n. 49, p. 64-68, 2000.

que executa a obra, por causa das diferenças na gerência. Os resíduos provenientes de demolições também são bem variados, porém dependem exclusivamente do tipo de construção demolida.

Apesar de existir uma grande gama de constituintes nos resíduos, normalmente há algum deles que se sobressai. Um estudo que mostra a diferença na constituição do RCD de acordo com cada local foi feito pela *Global Recycling Network*<sup>23</sup> (2005 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 28) em que mostra que a madeira é o material mais utilizado na construção japonesa e americana, já o gesso está presente em maior quantidade na Europa e nos EUA, tendo sido implantado a pouco tempo nos demais países.

Nos estudos mencionados acima são descritas as diferenças na composição dos RCD em alguns países, mas nada muito claro sobre o Brasil. Para uma melhor definição sobre os resíduos no nosso País, Carneiro<sup>24</sup> (2005 apud KARPINSKI et al., 2009, p. 29) cita uma compilação feita a partir de dados de vários autores:

Muitos pesquisadores têm estudado a composição dos RCD em diferentes cidades brasileiras e também em outros países, comprovando sua alta variabilidade [...]. Em todas as cidades pesquisadas [no Brasil] verificou-se que os materiais cimentícios (concreto e argamassa) foram os que apresentaram maior participação na composição dos RCD, chegando a representar, na cidade de São Carlos/SP, por exemplo, aproximadamente, 70% do RCD gerado.

Se nos estudos feitos sobre a composição de RCD no Brasil a predominância de materiais é de concreto e argamassa, no estudo feito por Lovato (2007, p. 23) apenas com resíduos de demolição, o resultado não foi muito diferente. Neste estudo ela revela que “Os resíduos de demolição são constituídos principalmente por concretos e tijolos, e em menores quantidades, por aço, plástico e madeira.”

Nos itens 3.4.1 e 3.4.2 são expostos alguns dos problemas dos RCD, como a alta variabilidade da sua constituição e também os diversos tipos de contaminantes que podem estar presentes nos resíduos.

---

<sup>23</sup> GLOBAL RECYCLING NETWORK. **Green Recycling exchange**. Disponível em <<http://www.grn.com/>>. Acesso em: 15 de novembro 2005.

<sup>24</sup> CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição da cidade do Recife**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

### 3.4.1 Variabilidade dos RCD

Mesmo com diversos estudos sendo feitos todos os anos sobre a composição destes resíduos, é muito difícil ter certeza do comportamento apresentado por um material que utilizar resíduos reciclados em sua composição. Esta incerteza é devida à grande variabilidade presente nos RCD, e resulta em uma maior resistência das empresas do ramo em usarem este tipo de material em suas obras. Esta variabilidade elevada deve ser combatida, devendo ser encontrado parâmetros para seu controle visto a alta heterogeneidade dos resíduos devida principalmente ao diversos locais e equipamentos geradores (LOVATO, 2007).

Os parâmetros mencionados são motivo de diversos trabalhos realizados tanto no Brasil quanto no mundo. Apesar da quantidade de estudos sobre o assunto, a alta variabilidade faz com que parâmetros encontrados em uma região sejam impróprios para serem usados em outra, tornando mais complicada a reciclagem dos RCD.

Apesar de apresentarem grande variabilidade, os componentes que constituem os RCD podem ser divididos de acordo com seu potencial de reciclagem. Lauritzen<sup>25</sup> (1994 apud CARNEIRO et al., 2001, p. 148-149) cita em sua obra quais são estas divisões:

- a) concretos, argamassas e rochas que, em princípio, apresentam, na sua totalidade, bom potencial para reciclagem;
- b) blocos, tijolos e cerâmicas, que apresentam também alto potencial de utilização, sem necessitar de processo sofisticado de tratamento;
- c) solos, areia e argila, que podem ser facilmente separados dos outros materiais por peneiramento;
- d) asfalto, material com alto potencial de reciclagem em obras viárias;
- e) metais ferrosos, recicláveis pelo setor de metalurgia;
- f) madeiras, material apenas parcialmente reciclável, sendo que madeiras com proteção impermeabilizante ou pinturas devem ser consideradas como material poluente e tratadas como resíduos químicos perigosos, devido ao risco de contaminação;
- g) outros materiais (plástico, borracha, papel, papelão, etc.) passíveis de reciclagem, embora esse processo nem sempre apresente vantagens que possam ser suportadas pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico; quando for o caso, esses materiais devem ser tratados como resíduos e dispostos de forma adequada.

---

<sup>25</sup> LAURITZEN, E. K. Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings. **Industry and Environment**, Paris, v. 17, n. 2, p. 26-31, abril/juin 1994.

Um dos responsáveis pela grande variabilidade dos RCD é citado por Carrijo<sup>26</sup> (2005 apud LOVATO, 2007, p. 19):

[...] nas pesquisas nacionais e internacionais existentes até o momento, não há um consenso com relação ao comportamento e desempenho de concretos com agregados reciclados. Essa diversidade de resultados pode ser explicada pela grande variabilidade na composição dos agregados reciclados, pela possível presença de impurezas e pelas diferentes porosidades dos agregados.

Estas impurezas são também chamadas de contaminação dos resíduos, e são explicadas melhor no item abaixo.

### 3.4.2 Contaminação dos RCD

Além da alta taxa de variabilidade dos resíduos, outro grande problema é a contaminação deles por diversos materiais, que, além de não agregarem valor estrutural, podem danificar a estrutura através de reações químicas ao passar do tempo. Estes materiais devem ser removidos sempre que possível, mas em muitos casos eles acabam sendo britados junto com resíduos mais nobres, como a argamassa e o concreto, e acabam virando componentes em novas estruturas.

Um exemplo de material contaminante e que frequentemente aparece é a matéria orgânica ou solos argilosos. Segundo Hansen (1992, p. 51), estes contaminantes são mais difíceis de serem removidos quando estão presentes no material, e mesmo as menores partículas de argila podem vir a ser danosas às estruturas. Entretanto, não há motivos para se acreditar que concretos fabricados com agregado reciclado contaminado com solos venham a ter um desempenho diferente do que os fabricados com agregados naturais.

Outro material que deve ser evitado ao máximo é o gesso. Em sua obra, Leite (2001, p. 27) salienta que:

O gesso deve ser cuidadosamente eliminado da composição do resíduo antes do seu beneficiamento. Ao ser britado, este material, por ser muito friável, transforma-se

---

<sup>26</sup> CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

em pequenas partículas que ficam completamente misturadas aos agregados produzidos, principalmente na fração do agregado miúdo. A eliminação da fração miúda com sucessivos peneiramentos poderia diminuir a quantidade de gesso porventura existente nos agregados reciclados produzidos. Todavia, ensaios de qualidade dos agregados devem mesmo assim ser realizados para garantir que não haja nenhum problema decorrente do uso deste material na produção de concretos.

Os metais, como aço, ferro, alumínio e zinco também pode causar problemas ao concreto em certas ocasiões, conforme citado por Hansen (1992, p. 52, tradução nossa):

Pequenas quantidades de aço ou pedaços de arame em agregados reciclados podem causar manchas ou pequenos danos à superfície dos concretos quando estiverem perto da superfície, principalmente na presença de cloretos. Peças de zinco e alumínio, provenientes de calhas, estruturas e cabos de fios elétricos podem causar liberação de hidrogênio no concreto fresco, ou ainda causar fissurações devido a expansões do concreto endurecido.

No entanto, é improvável que quantidades significativas de aço ou outros materiais metálicos acabem ficando no agregado reciclado. O aço pode ser facilmente removido por separação magnética, e isto será feito geralmente, pois há o risco de danificar os trituradores usados para processar o concreto antigo.

Os grandes vilões da reciclagem de RCD, e que frequentemente são citados em trabalhos, são os cloretos. Estas substâncias, constituintes dos sais, são normalmente encontradas em áreas marinhas ou até mesmo em alguns aditivos feitos à base de cloretos, e são altamente corrosivos em contato com as armaduras do concreto armado. Os seus íons penetram nas estruturas e aos poucos vão diminuindo a resistência da mesma, podendo levar à ruína da edificação ao longo do tempo (HANSEN, 1992, p. 49).

Além dos cloretos e dos materiais citados acima, outras substâncias podem afetar o desempenho de concretos feitos com agregados reciclados. Ainda segundo Hansen (1992, p. 48, tradução nossa), são elas:

Várias substâncias orgânicas, como madeira, tecidos têxteis, papéis, silicones e outros materiais polímeros, são instáveis no concreto quando submetidas a ciclos de secagem e molhagem ou gelo e degelo. Outras substâncias orgânicas como tintas podem incorporar quantidades consideráveis de ar ao concreto.

Como consequência, limites estreitos sobre a quantidade de contaminantes orgânicos devem ser impostos nas especificações para agregados reciclados, assim como para concretos que recebem estes agregados.

Com tantos materiais e substâncias nocivas podendo estar presentes nos RCD, tem que se ter muito cuidado na reciclagem. Sempre que possível, há que se removerem estas impurezas,



para que o concreto que receba o agregado reciclado possua a qualidade desejável. Apesar de necessária, esta remoção pode representar uma desvantagem do ponto de vista econômico, que deve ser avaliada juntamente com os demais pontos já citados neste trabalho.

### 3.5 CONCRETOS COM FIBRA DE POLIPROPILENO

As fibras são compostos que vêm sendo utilizados há anos pelo setor da construção civil. No caso das fibras de polipropileno (PP), elas são usadas por agregarem características singulares aos concretos, auxiliando no combate à certas patologias encontradas em estruturas de concreto.

Um dos motivos causadores de patologias em concreto é devido às fissuras por assentamento plástico, que é um fenômeno no qual a água presente no concreto durante o seu lançamento se acumula ao redor do aço, e posteriormente se desloca para a superfície do concreto, onde evapora. Este evento faz com que o concreto se retraia, causando fissuras na superfície e diminuição do cobrimento da armadura. Outra patologia ocorrida deste evento é o aumento do desgaste na superfície do concreto, pois a água que se acumula na superfície faz com que neste local a relação a/c seja muito alta, tornando o concreto mais poroso e, conseqüentemente, mais suscetível ao desgaste (DOBBIN JR.; ROCHA, 2011).

Para combater estas patologias, muitas empresas estão adicionando fibras de PP. Estas fibras atacam diretamente a causa destes problemas, pois impedem esta migração da água contida no concreto para a sua superfície, agindo como barreiras. Este mecanismo acaba diminuindo a exsudação e por consequência as fissuras por assentamento plástico, além de reduzir a camada porosa na superfície do concreto, diminuindo o desgaste (DOBBIN JR.; ROCHA, 2011).

### 3.6 RESOLUÇÃO N. 307/2002 DO CONAMA

Conforme visto nos itens anteriores, a geração de RCD é um problema com o qual se deve conviver. Sejam provenientes de obras ou de demolições, os resíduos inevitavelmente acabam sendo gerados, mesmo em países com as tecnologias mais avançadas. Pela dificuldade em se diminuir a geração de resíduos foi que o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) criou a Resolução n. 307/2002, em que

estabelece responsabilidades e deveres aos geradores de resíduos da construção civil (RCC), tornando-os responsáveis pelos resíduos gerados.

Para criar esta Resolução, o Conama (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 1) considerou os seguintes fatos:

- a) [...] a necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil;
- b) [...] a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental;
- c) [...] os resíduos da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas;
- d) [...] os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reformas, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos;
- e) [...] a viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil.

Com isto, foi possível estabelecer as diretrizes e procedimentos para a correta gestão dos RCC. Porém, para isto, foi necessária a adoção de algumas definições e nomenclaturas, cujas mais importantes estão descritas abaixo conforme o artigo 2 da Resolução (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 1-2):

- a) resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;
- b) geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;
- c) transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;
- d) agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;
- e) gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas,

procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

- f) reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;
- g) reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;
- h) beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo à operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

Além destas definições, também foram criadas classificações para os RCC, para um melhor entendimento do gerador do resíduo. Estas classificações estão dispostas abaixo, de acordo com o artigo 3 da Resolução (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 2-3):

- a) classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como,
  - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
  - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- b) classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso [Na Resolução n. 431/2011 a classificação do gesso foi alterada da classe C para a classe B, podendo ser reciclado.];
- c) classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Tendo sido classificados os RCC, foi descrito como eles devem ser destinados de acordo com sua classe. No artigo 10 está disposto da seguinte maneira (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, p. 4-5):

- a) classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;
- b) classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- c) classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;
- d) classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Com os dados contidos nesta Resolução, fica bem explícito o dever de cada um quanto à correta alocação dos resíduos gerados. No caso dos resíduos da construção das celas modulares de concreto com fibra, por não poderem ser descartados legalmente, devem ser reciclados. Com este trabalho comprovando a possível utilização dos resíduos gerados como agregado reciclado, a empresa poderá reciclá-los, diminuindo assim o impacto ambiental que causaria caso contrário.

## 4 DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade é uma das características mais importantes que o concreto possui. Uma alta durabilidade significa, basicamente, que uma estrutura continuará com as suas características desejáveis por um período de tempo aceitável, não sendo peculiar a sua determinação. De acordo com Ferreira (2000), o concreto pode ser deteriorado tanto internamente quanto externamente, tendo suas propriedades alteradas de modo mecânico, físico ou químico. Como o agregado graúdo utilizado neste trabalho é proveniente de resíduos, as características internas e externas do concreto são diferentes do convencional, o que pode acarretar problemas com a durabilidade.

A deterioração pode ser agravada por diversos fatores. Entre os internos, que dizem respeito às características do concreto, pode-se citar o descumprimento de normas na confecção e cura do concreto além da utilização de materiais de baixa qualidade ou inadequados para certos ambientes. Já para os externos, pode-se citar o clima de cada região, como temperatura e umidade, a poluição do ar e da água, que podem possuir mais ou menos substâncias danosas ao concreto e também a força e quantidade de impactos sofridas pelo material. Estes fatores podem agir sozinhos ou se combinarem para alterar a capacidade e desempenho do material (FERREIRA, 2000). Nos itens abaixo são expostos e explicados alguns dos fatores que afetam a durabilidade do concreto.

### 4.1 FATORES DE DEGRADAÇÃO MECÂNICOS E FÍSICOS

A degradação do concreto resultante dos fatores mecânicos e físicos são as mais facilmente visíveis nas estruturas. Normalmente afetam mais externamente do que internamente, produzindo fissuras, buracos, desgastes e desprendimentos na superfície.

Em locais onde ocorrem ciclos de gelo e degelo, ou geadas, há uma grande preocupação com a durabilidade do concreto, pois a água contida nos poros do concreto se expande ao congelar, criando microfissuras. Ao longo de vários ciclos, estas fissuras se acumulam e acabam rompendo partes do concreto, permitindo uma maior entrada de agentes nocivos. A variação

térmica não é só um agravante quando congela e descongela a água, mas também quando oscila demais. Esta oscilação faz com que a estrutura de concreto se contraia e expanda, e se estas tensões forem maiores que a resistência à tração do concreto, ocorre fissurações. Além disto, há um problema gerado através do gradiente térmico das estruturas, que cria tensões entre as camadas do concreto em elementos de grandes dimensões, como barragens e fundações. Nestes casos, a temperatura interior da estrutura está com temperatura elevada, em razão da hidratação do cimento, já a temperatura exterior encontra-se mais baixa, podendo causar grandes fissuras (FERREIRA, 2000).

Um dos principais problemas relacionados à durabilidade do concreto é a abrasão sofrida, principalmente quando este é usado como pavimento. A abrasão é definida como o processo que gera o desgaste superficial do concreto, através do atrito, principalmente devido ao excesso de fricção ou qualquer tipo de esfregamento contínuo. Esta situação faz com que a camada externa do concreto se desprenda, gerando poeira ou até mesmo soltando partes. A redução deste problema é possível através da utilização de um concreto com resistência à compressão maior e uma relação água/cimento menor, diminuindo assim a porosidade em sua superfície (FERREIRA, 2000).

Outro problema que pode ser relacionado a fatores mecânicos e físicos, é a erosão e a cavitação, presentes principalmente quando o concreto está em contato com escoamento de água. A erosão se deve ao choque das partículas em suspensão na água contra a superfície do material, já a cavitação é proveniente da explosão de bolhas junto ao material devido à queda repentina da pressão no local, ocorrido principalmente em fluidos com grandes velocidades. Cavitação e erosão estão mais presentes em tubulações, túneis e canais artificiais, e ao passar do tempo o desgaste pode ser significativo, levando a estrutura ao colapso.

## 4.2 FATORES DE DEGRADAÇÃO QUÍMICOS

A degradação do concreto através de agentes químicos não é tão facilmente observada, o que pode ser um problema ao ser detectada em estado avançado. Esta degradação ocorre através do ataque de sais e ácidos dissolvidos que entram em contato com o concreto e produzem reações químicas com seus componentes, alterando ou dissolvendo-os. Estes ataques podem ocorrer tanto externamente, gerando uma camada de deterioração na superfície do concreto,

quanto internamente, onde as substâncias entram através dos poros e podem vir a corroer o aço no interior da estrutura.

Segundo Ferreira (2000, p. 3.21), existem três modos como um fluido pode entrar nos poros do concreto:

- a) difusão: resulta da diferença de concentrações iônicas entre um fluido externo agressivo e o fluido interno nos poros do concreto. A penetração neste caso é por difusão;
- b) pressão hidrostática: diferenças na pressão dos fluidos em superfícies opostas de um elemento estrutural. A penetração resulta do fluxo hidráulico;
- c) forças capilares: o meio líquido penetra nos poros do concreto devido a um mecanismo capilar;

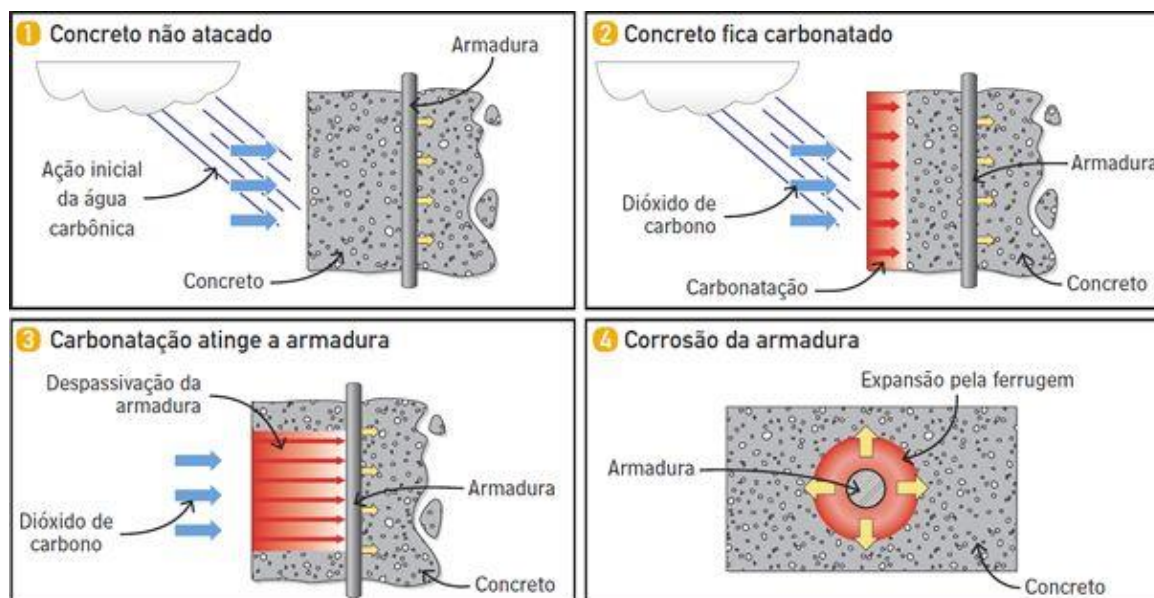
Tendo sido expostas as formas como um fluido pode entrar nos poros do concreto, abaixo são descritos alguns dos ataques químicos mais comuns e importantes ao concreto.

#### **4.2.1 Carbonatação**

A carbonatação é um dos fatores que mais degradam o concreto. Trata-se de um fenômeno no qual gases ácidos presentes no meio ambiente reagem com produtos alcalinos do concreto, formando substâncias com pH mais baixo. Este declínio do pH faz com que a camada de óxido presente ao redor do aço, e que o protege contra a oxidação, seja enfraquecida, tornando-o mais suscetível à corrosão. A reação mais comum é entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio, gerando os carbonatos, que alteram a estrutura da pasta de cimento, baixando o pH junto à armadura (KULAKOWSKI, 2002).

Segundo Kulakowski (2002), a carbonatação se desenvolve do exterior para o interior, fazendo com que haja três camadas distintas dentro do concreto. A camada mais externa é onde o concreto está carbonatado, possuindo normalmente um pH abaixo de 9, já a camada mais interna possui um pH acima de 12, não sendo carbonatada. Há entre as duas uma camada intermediária, onde o processo de carbonatação está ocorrendo e o pH varia entre os dois valores. Na figura 2, é possível verificar como ocorre este processo no concreto, desde o início da carbonatação até a corrosão do aço.

Figura 2 – Processo de carbonatação em concreto armado



(fonte: CORSINI, 2013)

O  $\text{CO}_2$  é ativo mesmo em baixas concentrações na atmosfera. Dados levantados por Ferreira (2000) apontam que a concentração deste gás na atmosfera pode variar bastante, sendo em média 0,03% em ambiente rural, 0,1% em cidades grandes e podendo chegar a picos de 1% dependendo da poluição do local. Segundo Kulakowski (2002), quanto maior a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente, mais rápida é a carbonatação do concreto. Entretanto, a velocidade de penetração tende a diminuir com o passar do tempo. Isto se deve a três fatores: a diferença de concentração do gás dentro e fora do concreto tende ao equilíbrio, o gás vai se difundindo entre os poros limitando sua passagem, e o principal fator é a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) dentro dos poros maiores, eliminando a porosidade permeável.

A melhor maneira de se combater a carbonatação é fazendo concretos com uma microestrutura mais densa. Isto pode ser feito com adição de materiais que reduzam a quantidade ou o tamanho dos poros no concreto e também com a redução da relação a/c.

#### 4.2.2 Cloretos

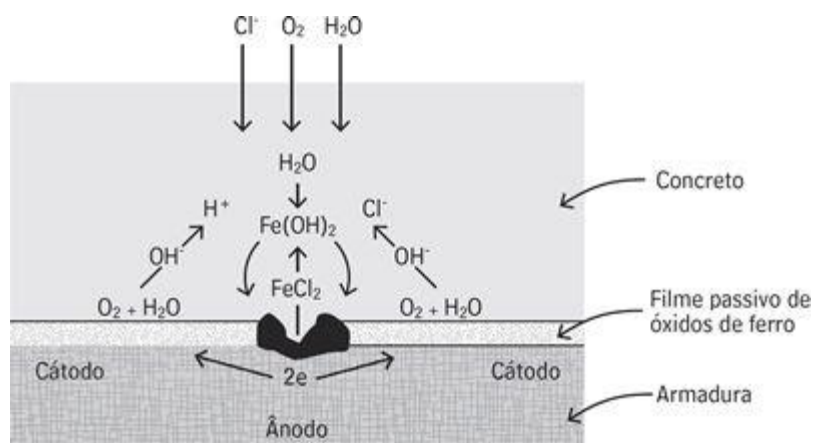
O ataque efetuado por cloretos no concreto é diferente dos demais, pois sua principal ação é corroer o aço, mesmo que acabe danificando também o concreto ao redor. Este tipo de ataque é um dos principais causadores de manifestações patológicas no concreto, sendo os íons



cloreto os responsáveis por esta degradação. Estes íons podem estar presentes no concreto desde a sua fabricação, provenientes de aditivos que possuam cloretos em sua fórmula ou agregados e água contaminada. Além disto, o concreto pode absorver íons ao longo de sua vida útil, sendo por processos de migração, absorção capilar ou difusão (FERREIRA, 2000).

A concentração mais importante no interior do concreto é a de íons cloreto livres, pois estes são os principais responsáveis por iniciar a corrosão do aço, e por isso são bastante estudados. O excesso destes íons inicia a deterioração do aço, que se retroalimenta através da criação de uma célula eletroquímica, onde as zonas corroídas se tornam o ânodo e o restante do aço, o cátodo. Na figura 3, é possível verificar um esquema de como funciona este mecanismo.

Figura 3 – Mecanismos de despassivação e corrosão das armaduras



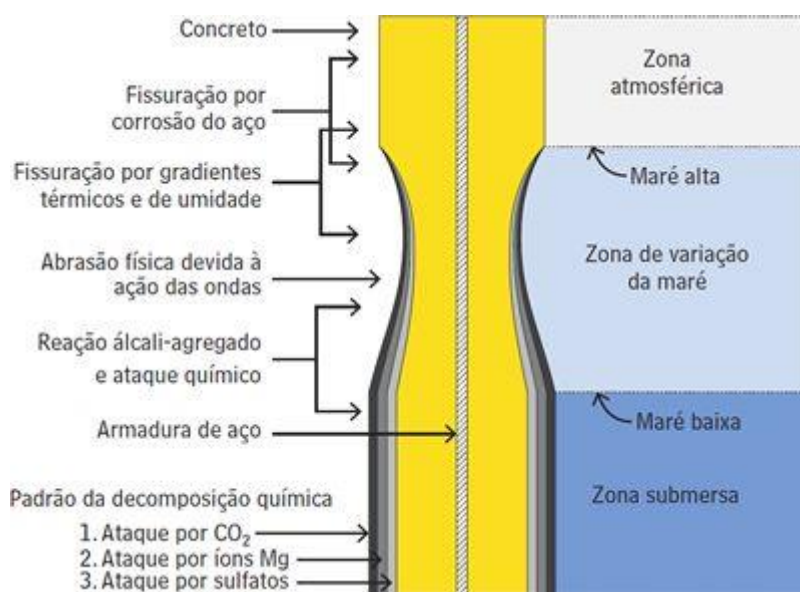
(fonte: CORSINI, 2013)

### 4.2.3 Outros elementos

Um dos locais com alto índice de manifestações patológicas no concreto é o ambiente marítimo. Nele o concreto pode ser atacado tanto pelo impacto físico das ondas, quanto pelo ataque químico dos sais presentes da água do mar, além dos ciclos de secagem e molhagem. Nestes locais, a estrutura pode sofrer ataques em três diferentes zonas, conforme mostrado na figura 4. A zona acima da maré alta é a que menos sofre desgastes, é onde o concreto está em contato com a atmosfera e pode sofrer ataques dos gases presentes no ar, como já mencionado. Na zona submersa, a estrutura sofre ataques principalmente dos sais contidos na água, ocasionando a deterioração da superfície do concreto, porém a corrosão do aço não é tão

intensa. A maior deterioração da estrutura acontece na zona entre a maré baixa e a maré alta, onde existe um grande ataque das ondas do mar, lixiviando e erodindo a superfície do concreto. Além disto, há um grande ataque químico devido à água do mar, que, somados aos ciclos de secagem e molhagem, causam grandes danos ao concreto e ao aço nesta região (FERREIRA, 2000).

Figura 4 – Zonas de degradação do concreto armado em ambiente marítimo



(fonte: CORSINI, 2013)

Ainda segundo Ferreira (2000), o problema da exposição do concreto aos sais é pelo fato da expansão cristalina, ocorrida a partir da dissolução destes na água presente nos poros do concreto. O acúmulo de sais nos poros do concreto pode ocorrer de duas formas, uma é devido aos ciclos de molhagem e secagem de água do mar. A cada ciclo, há um acúmulo de sais nos poros após a evaporação da água, gerando tensões internas. Outra forma é quando o concreto se encontra em contato com a água salina em apenas uma face, neste caso a água atravessa o concreto por absorção capilar e acaba evaporando na outra face, gerando novamente um acúmulo de sais e conseqüentemente tensões expansivas, podendo desagregar partes do concreto.

Outra reação que pode ocorrer é entre os álcalis do cimento e agregados potencialmente reativos. Estas reações podem causar desde expansões e fissuras no concreto, até redução das resistências à tração e compressão.

## 5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho faz parte de estudos maiores feitos com os resíduos de concreto com fibra de polipropileno. Conforme já mencionado, o objetivo principal deste trabalho é estudar a durabilidade de concretos feitos com substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, cabendo a outro trabalho, realizado por Zitto (2014), os ensaios mecânicos de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. O concreto utilizado nos dois trabalhos foi o mesmo, sendo separados somente os corpos de prova que cada um necessitaria. Sendo assim, foram utilizados os dados de resistência à compressão deste outro trabalho para auxiliar na caracterização do concreto.

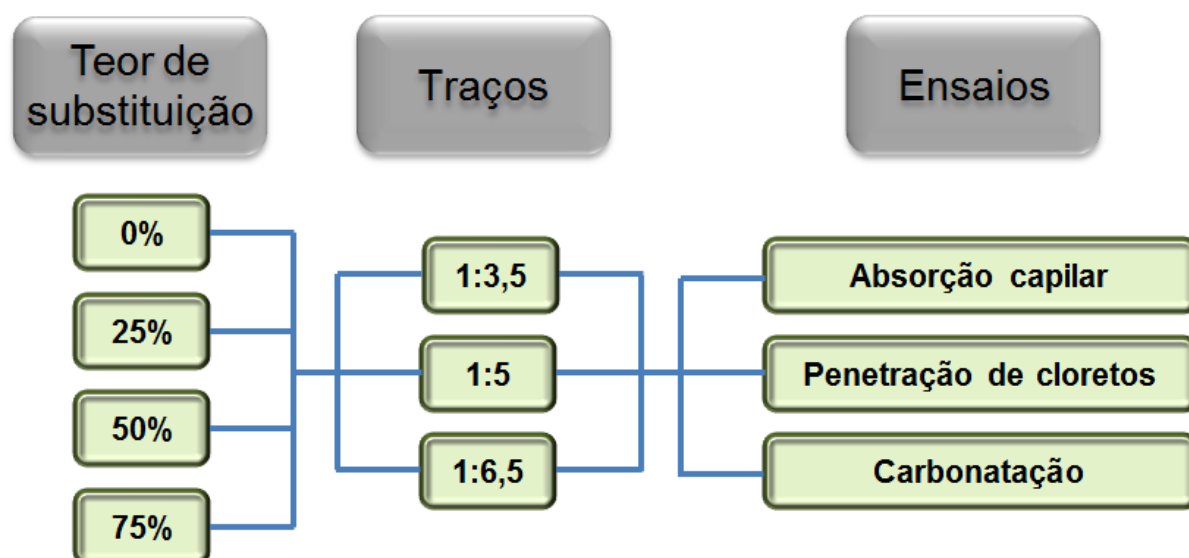
Neste capítulo são explicitados o planejamento experimental e os materiais utilizados na fabricação do concreto, assim como explicada a metodologia utilizada na sua confecção, e também na moldagem e cura dos corpos de prova e nos ensaios.

### 5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

No programa experimental são organizadas as etapas que serão necessárias para se executar os ensaios pretendidos, com a devida organização necessária. Com ele é possível alcançar com qualidade os objetivos pretendidos. Na figura 5 é possível verificar através de um diagrama o programa adotado.

Nesta parte foi definida a utilização de uma metodologia de tratamento de dados que garante a confiabilidade de 95% aos resultados, através da análise do desvio padrão e variância. Juntamente à isto, foi utilizada a tabela ANOVA, a qual analisa estatisticamente a influência das variáveis independentes em relação às variáveis de resposta, mostrando assim uma possível influência entre elas. Desta forma, é possível garantir a qualidade dos resultados obtidos em laboratório,

Figura 5 – Diagrama esquemático do programa experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

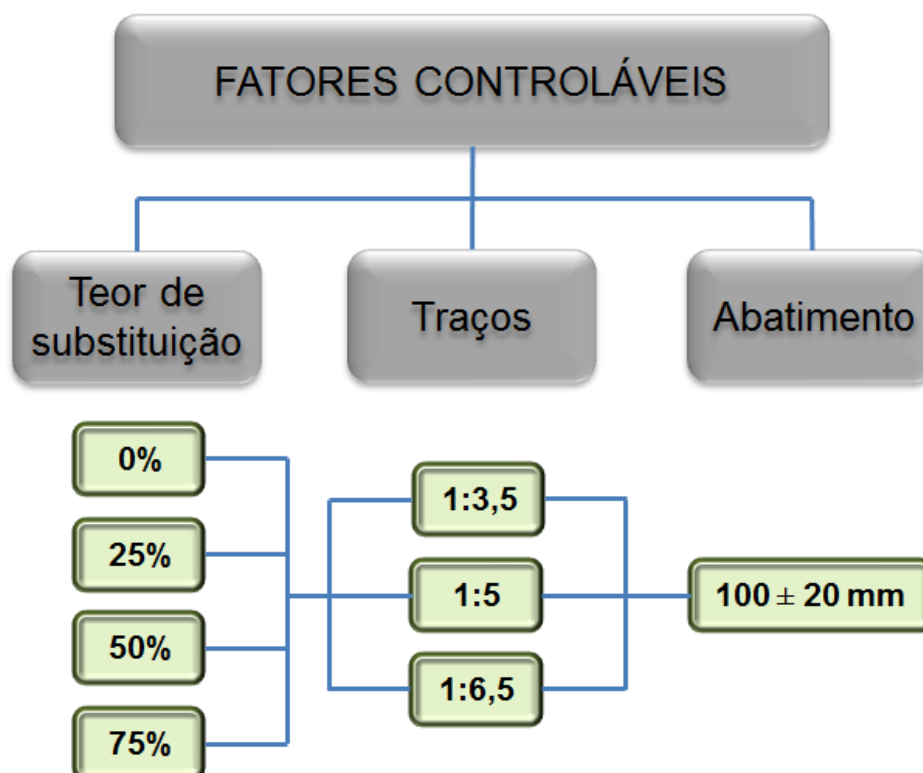
### 5.1.1 Planejamento experimental

O planejamento experimental é fundamental para um bom entendimento do que se propõem a pesquisa. Além disto, um planejamento bem feito otimiza e racionaliza os recursos necessários e traz maior confiabilidade ao processo quando comparado à planejamentos deficitários.

Neste trabalho os ensaios visam verificar a durabilidade dos diferentes concretos produzidos, através dos ensaios de absorção por capilaridade, penetração de cloretos e carbonatação. Para isto, foram produzidos concretos com três traços diferentes, sendo que cada traço continha quatro teores de substituição de agregado graúdo natural pelo reciclado. Além disto, para cada ensaio foi definido a utilização de três corpos de prova por traço e por teor de substituição, sendo 36 CPs por ensaio, totalizando 108 no trabalho.

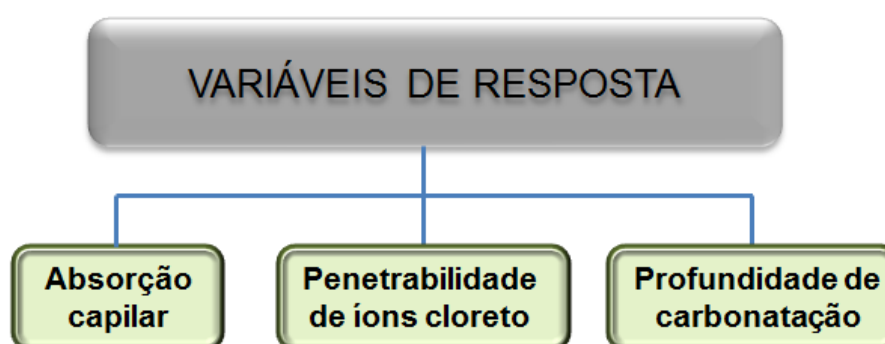
Foram estipuladas também quais seriam as variáveis dependentes e as independentes, além da confecção da matriz experimental. Na figura 6 é possível verificar o diagrama da das variáveis independentes (fatores controláveis) e na figura 7 são demonstradas as variáveis dependentes (variáveis de resposta).

Figura 6 – Fatores controláveis



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 – Variáveis de resposta



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis são aqueles determinados pelo pesquisador e são responsáveis por interferirem nas variáveis de resposta. Para este trabalho foi definido que os fatores

controláveis seriam o teor de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, os traços do concreto e o abatimento do tronco de cone no ensaio *slump*.

O teor de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado foi escolhido de forma a possibilitar a análise do comportamento do concreto ao serem comparados diferentes percentuais estabelecidos. Os teores foram escolhidos de forma a possibilitar a verificação deste comportamento desde o concreto sem substituição, chamado referência, até concretos com 75% de teor de substituição do agregado graúdo.

Os traços definidos tendem a abranger uma grande gama de concretos, desde o mais rico (1:3,5) até o mais pobre (1:6,5). Deste jeito é possível analisar os diferentes comportamentos do concreto em relação apenas ao traço e combinando este comportamento com o teor de resíduos incorporados. Já o teor de abatimento  $100 \pm 20$  mm foi escolhido pelo fato de ser um intervalo de valores que permite o bombeamento do concreto caso seja necessário, o que é bastante comum em obras hoje em dia.

### **5.1.3 Variáveis de resposta**

As variáveis de resposta, também conhecidas por variáveis dependentes foram escolhidas por serem as mais significativas em ensaios de durabilidade. Foram escolhidas a absorção de água por capilaridade, a penetração de íons cloretos e a profundidade de carbonatação.

A absorção de água por capilaridade está diretamente ligada à durabilidade do concreto, pois quanto maior é a absorção deste material, maior é a probabilidade de que substâncias nocivas adentrem ao concreto, podendo causar às armaduras. O caso da penetração de íons cloreto é parecido, quanto maior a penetração destes íons, maior é a probabilidade de corrosão da armadura. Porém, neste caso, a medição efetuada é em relação à corrente que passa pelo corpo de prova de concreto ao ser submetido à uma certa voltagem, e com este valor é determinada a penetrabilidade do concreto. Já a profundidade de carbonatação é medida devido ao fato que este processo auxilia na corrosão do aço da armadura, sendo que quanto maior a profundidade da carbonatação em um determinado tempo, mais rápido se iniciará a corrosão do aço.

## 5.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Na tabela 2 esta disposta a matriz experimental elaborada com os fatores controláveis e as variáveis de resposta, assim como a nomenclatura que será utilizada para os corpos de prova.

Tabela 2 – Matriz experimental

Identificação	Fatores controláveis			Variáveis de resposta		
	Traços	Teor de subst. (%)	Abatimento (mm)	Absorção capilar (g/cm <sup>2</sup> )	Penetrabilidade de íons cloreto (Coulombs)	Profundidade de carbonatação (mm)
A1	1:3,5	0	100 ± 20	90 dias	180 dias	180 dias
A2		25				
A3		50				
A4		75				
B1	1:5	0				
B2		25				
B3		50				
B4		75				
C1	1:6,5	0				
C2		25				
C3		50				
C4		75				

(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para todos os concretos foram utilizados os mesmos materiais, não alterando nem mesmo o lote. Nos itens abaixo são expostas as caracterizações dos mesmos.

### **5.3.1 Água**

A água utilizada neste trabalho é proveniente da rede pública de Porto Alegre e foi devidamente dosada em cada concretagem.

### **5.3.2 Cimento**

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente à sulfatos (CP-V ARI RS). Ele é amplamente utilizado em locais onde se necessita desformar o concreto rapidamente, como em fábricas de blocos para alvenaria e estruturas pré-moldadas, pois adquire alta resistência à compressão no dia seguinte à concretagem. Para este trabalho ele foi escolhido por ser um cimento de grande utilização no Rio Grande do Sul, pois todos os ensaios foram feitos com o mínimo de 28 dias de cura, não interferindo assim a sua alta resistência inicial.

### **5.3.3 Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado no trabalho foi classificado como areia quartzosa natural com distribuição contínua, também conhecida como areia média. A sua distribuição granulométrica, caracterização física e limites de granulometria estão de acordo com o recomendado pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e podem ser verificados na tabela 3 e no gráfico da figura 8.

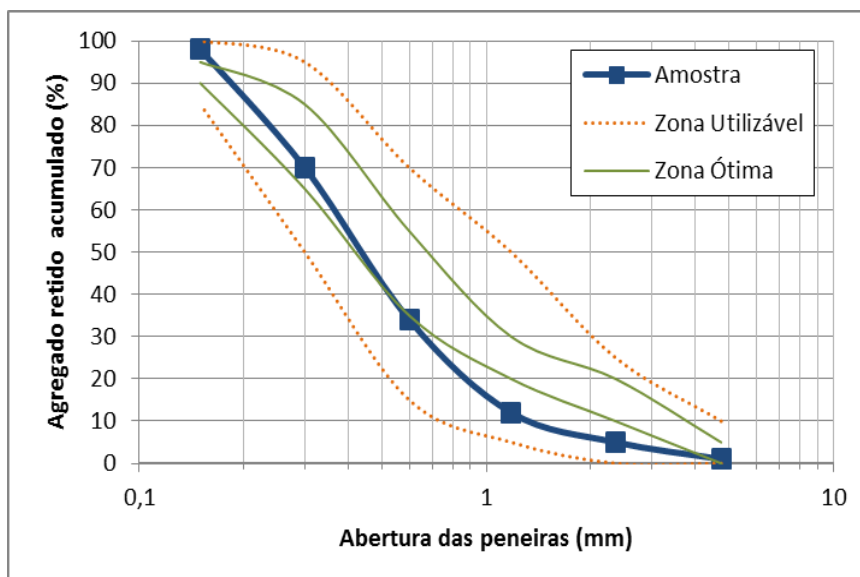


Tabela3 – Granulometria e caracterização do agregado miúdo

Resultados obtidos			
Abertura da peneira (mm)	Quantidade retida (%)		Módulo de finura
	Individual	Acumulada	Dimensão máxima (mm)
4,75	1	1	2,20
2,36	4	5	2,36
1,18	7	12	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
0,6	22	34	Absorção de água (%)
0,3	36	70	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
0,15	28	98	
fundo	2	100	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.4 Agregado graúdo natural

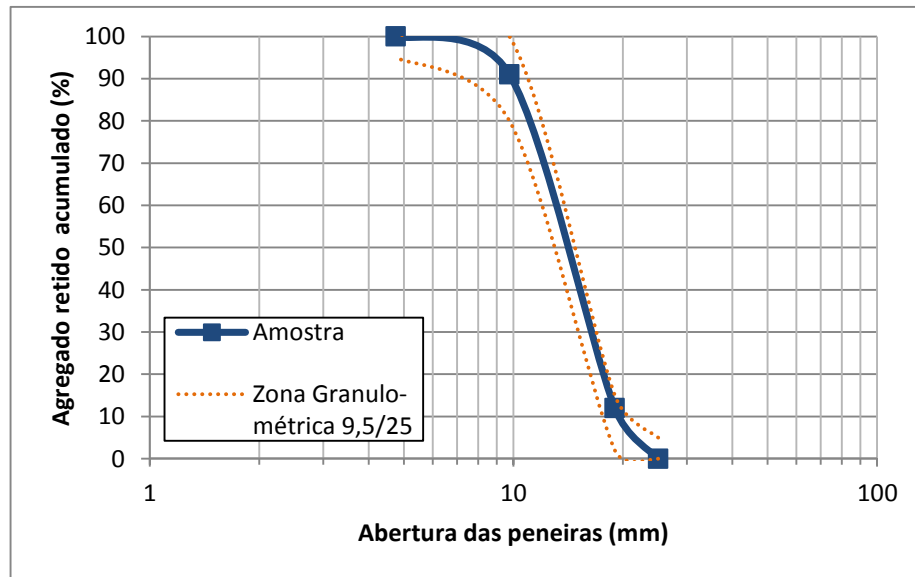
O agregado graúdo utilizado no trabalho foi classificado como brita basáltica natural, também conhecido comercialmente como brita 1 e sendo da zona granulométrica 9,5/25. A sua distribuição granulométrica, caracterização física e limites de granulometria estão de acordo com o recomendado pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e podem ser verificados na tabela 4 e no gráfico da figura 9.

Tabela 4 – Granulometria e caracterização do agregado graúdo natural

Resultados obtidos				
Abertura da peneira (mm)	Quantidade retida (%)		Módulo de finura	7,03
	Individual	Acumulada	Dimensão máxima (mm)	25,00
19	12	12	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,98
9,5	79	91	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,38
4,75	9	100		
2,36	0	100		
1,18	0	100		
0,6	0	100		
0,3	0	100		
0,15	0	100		
fundo	0	100		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 9 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.5 Agregado graúdo reciclado

O agregado graúdo reciclado utilizado no trabalho é proveniente de resíduos de concreto com fibra de polipropileno (PP). O concreto original é auto adensável e de elevada resistência à compressão, chegando a um  $f_{ck}$  de 90 MPa. Sua coloração é branca, como pode ser visto na figura 10, e as fibras de PP estavam presentes com fins estruturais originalmente. A sua distribuição granulométrica, caracterização física e limites de granulometria estão de acordo com o recomendado pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) e podem ser verificados na tabela 5 e no gráfico da figura 11.

Estes resíduos são provenientes principalmente de corpos de provas usados para testes de resistência dos concretos. Outra fonte de geração destes resíduos são peças que não passam no controle de qualidade da empresa, por motivos de baixa resistência ou falhas na concretagem.

Figura 10 – Resíduo reciclado britado



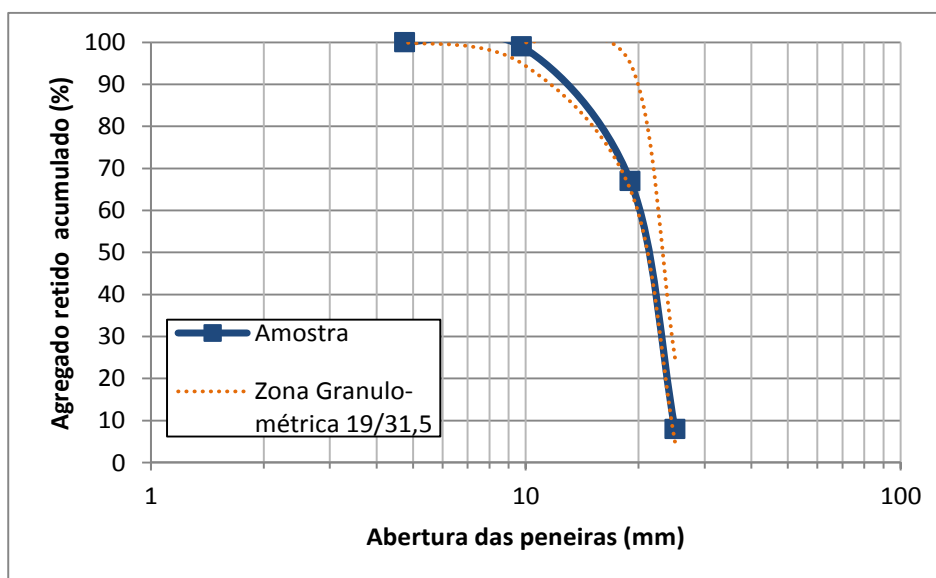
(fonte: foto tirada pelo autor)

Tabela 5 – Granulometria e caracterização do agregado graúdo reciclado

Resultados obtidos				
Abertura da peneira (mm)	Quantidade retida (%)		Módulo de finura	7,67
	Individual	Acumulada	Dimensão máxima (mm)	32,00
25	8	8	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63
19	59	67	Absorção de água (%)	7,5
12,5	32	99	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,72
9,5	1	100	Índice de forma	2,43
6,3	0	100		
4,75	0	100		
2,36	0	100		
1,18	0	100		
0,6	0	100		
0,3	0	100		
0,15	0	100		
fundo	0	100		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Gráfico de distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.4 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Antes de ser iniciada a produção do concreto, foi definido que seriam utilizados três traços de concreto para cada teor de substituição de agregado, totalizando 12 traços diferentes, e que o abatimento do tronco de cone seria fixado em  $100 \pm 20$  mm (*slump test*). Os traços estipulados foram os de 1:3,5, 1:5 e 1:6,5, considerados traços rico, intermediário e pobre.

Para a dosagem foi utilizado o método IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992). Este tem por finalidade obter o teor de argamassa ideal ( $\alpha$ ) utilizando concretos com o mesmo abatimento no *slump test*. A dosagem experimental foi feita com o maior teor de substituição do agregado graúdo, pelo fato de ser o que traria a pior trabalhabilidade, e traço 1:5 entre cimento e agregados secos, sendo obtido um  $\alpha$  de 56%. Para o concreto com 0% de substituição, foi determinado um  $\alpha$  de 53% com base em trabalhos anteriores efetuados no mesmo laboratório e com os mesmos materiais. Para os traços com substituição de 25% e 50%, foram interpolados os valores e adotaram-se teores de argamassa ideal de 54% e 55% respectivamente. Para o cálculo da quantidade de cada material que seria utilizado nos traços, foi usada a correlação das leis comportamentais do concreto, que é dada pelas fórmulas 1 e 2, sendo que o agregado graúdo natural foi substituído pelo reciclado levando em consideração a massa empregada.

$$\alpha = (1+a) / (1+m) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$\alpha$  = teor de argamassa seca [kg/kg];

$a$  = relação de agregado miúdo seco / cimento em massa [kg/kg];

$m$  = relação agregados secos / cimento em massa [kg/kg].

$$m = a+p \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$m$  = relação agregados secos / cimento em massa [kg/kg];

$a$  = relação de agregado miúdo seco / cimento em massa [kg/kg];

$p$  = relação de agregados graúdos secos / cimento em massa [kg/kg].

Com estas fórmulas como base, foi iniciada a produção do concreto, que é descrita no próximo item.

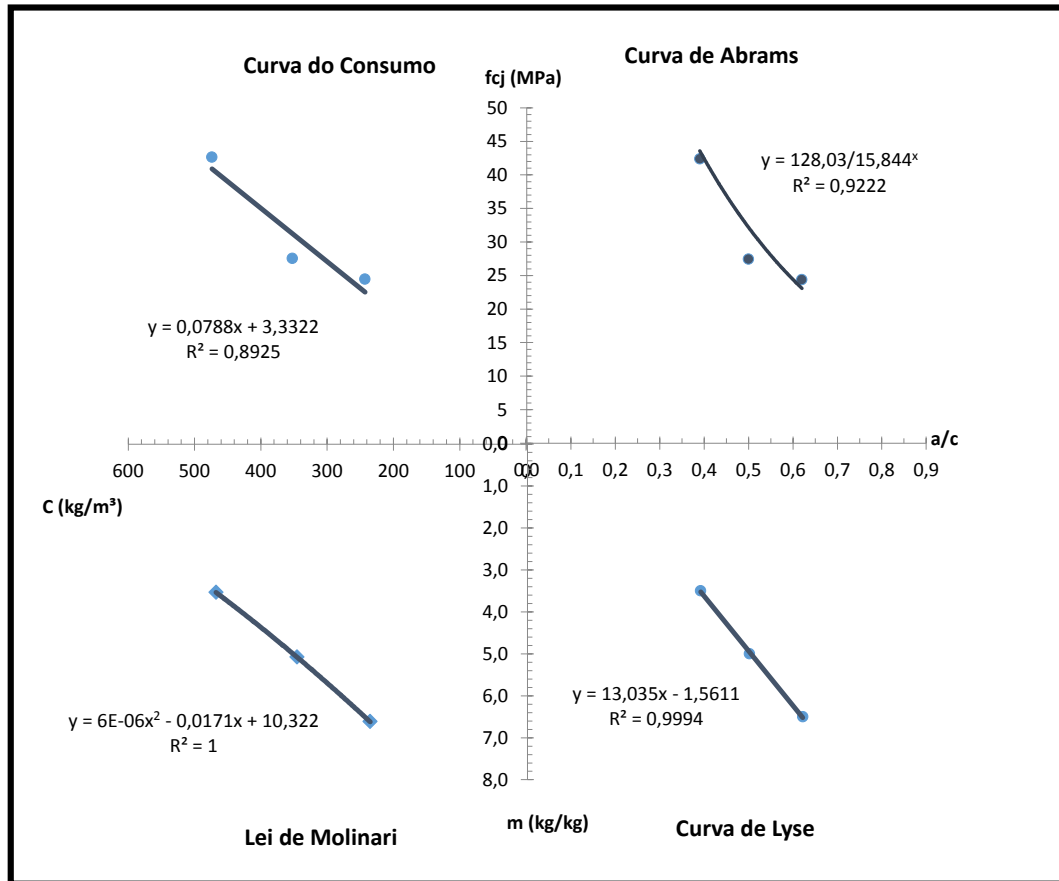
### 5.4.1 Produção do concreto

O concreto deste trabalho foi produzido no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (Lamtac), na UFRGS. Antes de iniciar a concretagem, o agregado reciclado foi imerso em água por uma semana, para evitar o excesso de absorção de água durante a confecção do concreto, e escorrido durante 10 minutos antes de ser adicionado à mistura. Este tempo foi escolhido, pois um estudo elaborado por Cordeiro (2010) compara diferentes tempos de escorrimento do agregado reciclado e no fim chega a conclusão que 10 minutos é o ideal. Foi respeitada a seguinte ordem para colocação dos materiais: brita natural, brita reciclada, metade da água necessária, cimento, areia e o restante da água.

Com os dados de dosagem e a resistência à compressão uniaxial, foi possível elaborar um gráfico com o diagrama de dosagem, fixando o abatimento e a substituição dos agregados. Os

dados para criação dos diagramas estão na tabela 6, já o gráfico com substituição de 75% está na figura 12. Os demais diagramas de dosagem estão no apêndice A.

Figura 12 – Diagrama de dosagem de concreto com 75% de substituição ( $\alpha = 56\%$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

Na tabela 6 é possível observar uma discrepância nos valores obtidos para o fcj do traço 1:6,5 com teor de 50% e nos traços 1:5 e 1:6,5 com teor de substituição de 75%. Para estas diferenças não foram encontradas respostas concretas, apenas podendo ser explicada por uma variação inerente ao processo.

Tabela 6 – Dados das dosagens e resistências para diferentes teores de substituição

Teor de subst.	Traços	$\alpha$	Traço unitario			a/c	Abatimento (mm)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	fej 28 dias
			c	a	p				
0%	1:3,5	53%	1	1,39	2,12	0,42	120	490,23	39,0
	1:5		1	2,18	2,82	0,49	100	376,07	33,0
	1:6,5		1	2,98	3,53	0,61	90	301,11	28,8
25%	1:3,5	54%	1	1,43	2,07	0,39	90	496,14	44,1
	1:5		1	2,24	2,76	0,4	80	376,71	38,1
	1:6,5		1	3,05	3,45	0,6	90	293,14	28,3
50%	1:3,5	55%	1	1,48	2,03	0,4	85	484,73	43,2
	1:5		1	2,30	2,70	0,57	95	356,16	37,1
	1:6,5		1	3,13	3,38	0,6	100	286,98	17,4
75%	1:3,5	56%	1	1,52	1,98	0,39	80	473,64	42,4
	1:5		1	2,36	2,64	0,5	80	352,30	27,5
	1:6,5		1	3,20	3,30	0,62	80	242,81	24,4

(fonte: adaptado de ZITTO, 2014)

#### 5.4.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Após a confecção de cada traço de concreto, foram moldados os corpos de prova respectivos para cada ensaio, tendo como base o roteiro descrito na NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Os corpos de prova cilíndricos possuem 10 cm x 20 cm de dimensão nos traços com 0%, 25% e 50% de substituição do agregado graúdo e de 9,5 cm x 19,5 cm de dimensão no traço com 75% de substituição. Esta diferença de tamanho se deve ao fato de que não havia corpos de prova suficientes do mesmo tamanho no dia da concretagem, porém os dados dos ensaios foram adaptados às diferentes dimensões. Os corpos de prova prismáticos possuem 10 cm x 10 cm x 35 cm de dimensão.



Assim que foram moldados, os corpos de prova ficaram 48h cobertos por uma lona plástica, a fim de minimizar a perda de água superficial. Depois deste período, foram desmoldados, identificados e levados para a câmara úmida, onde ficaram submersos em água saturada com cal até o dia do seu respectivo ensaio.

### 5.4.3 Ensaio de absorção capilar

Para este ensaio, foi seguido o procedimento descrito na norma NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), com a diferença de que o tempo de cura do concreto foi de 90 dias, ao invés de 28 dias. O ensaio consiste em verificar a absorção de água pelo concreto através da ascensão capilar e, como parâmetro principal, é utilizado o ganho de massa das amostras em contato com a água ao longo do tempo.

Inicialmente os corpos de prova já curados são secos em uma estufa a 70 °C até que atinjam equilíbrio de massa, esta temperatura é utilizada para não desestabilizar as fibras de PP. Após isto, são colocados dentro de um recipiente onde se encontram em contato com uma camada de água de  $5 \pm 1$  mm, para ser iniciado o processo de absorção. O recipiente é fechado para que não haja perda de água pelas laterais dos corpos de prova. Em intervalos de tempo determinados as amostras são pesadas, gerando assim uma curva com o ganho de massa de cada espécime, que deve ser expresso em  $\text{g}/\text{cm}^2$  e calculado conforme a fórmula 3.

$$C = (A-B) / S \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ];

A = massa do corpo de prova em contato com a água [g];

B = massa do corpo de prova seco, medida no início do ensaio [g];

S = área da seção transversal [ $\text{cm}^2$ ].

Na figura 13 é possível verificar a secagem das amostras em forno e a alocação das mesmas em recipiente com camada de água, que se encontra sem o isolamento plástico para melhor visualização.

Figura 13 – Ensaio de absorção capilar em andamento



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.4.4 Ensaio de penetração de cloretos

Para este ensaio, foi seguido o procedimento mais utilizado mundialmente, e que é descrito na norma ASTM C1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), com a diferença de que o tempo de cura foi de 180 dias, ao invés de 28 dias. O ensaio consiste em verificar a carga passante através de uma amostra de concreto ao ser aplicada uma diferença de potencial entre as duas extremidades do mesmo. Através dos valores encontrados, é possível verificar qualitativamente a predisposição do concreto quanto aos ataques de íons cloretos, ou seja, quanto mais carga passar, maior é a propensão à penetração destes íons no concreto.

O ensaio se inicia com a preparação dos corpos de prova a serem ensaiados. Inicialmente é necessário retirar uma fatia com  $50 \pm 3$  mm de espessura da parte de central de cada corpo de prova, que foi chamada de bolacha. Este procedimento é necessário para que se obtenha uma amostra mais homogeneizada, com o mínimo de interferência das faces superior e inferior. Após isto, as bolachas devem ser impermeabilizadas lateralmente com resina epóxi. Na figura 14 é possível verificar as bolachas com a resina passada e suas identificações.

Figura 14 – Fatias de concreto com resina passada e identificadas



(fonte: foto tirada pelo autor)

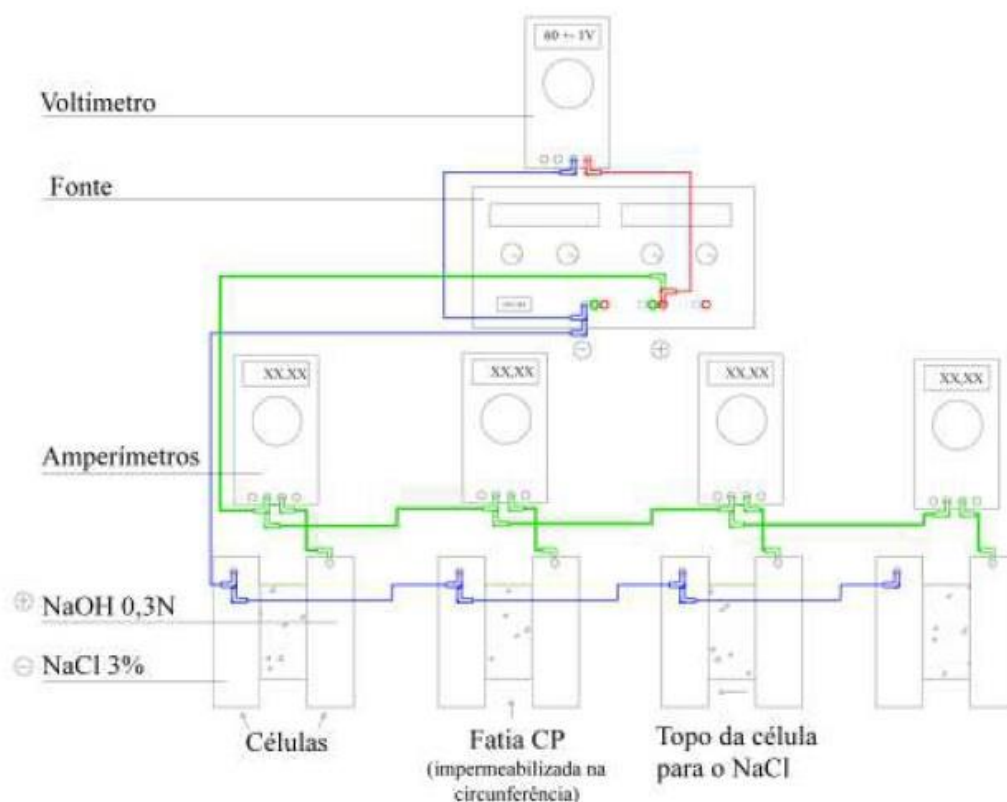
A próxima etapa é deionizar e deaerar uma quantidade suficiente de água destilada, que é utilizada para retirar impurezas dos poros do concreto que possam interferir nos resultados obtidos. No trabalho foi utilizada água deionizada comprada, que foi deaerada sendo fervida até que se obtivesse redução de 25% no seu volume.

Na etapa seguinte, as bolachas devem ser colocadas dentro de um dessecador e serem mantidas no vácuo por 3h. Após este período é inserido, aos poucos, a água deionizada e deaerada tomando o cuidado para manter sempre o vácuo. Depois de deixar a bomba a vácuo ligada por mais uma hora com a água dentro, a bomba é desligada e deixa-se o dessecador vedado por  $18 \pm 2$ h antes de retirar as amostras.

O próximo passo é fazer a montagem das células de acrílico. Para isto são colocadas arruelas metálicas junto com uma tela também metálica no vão do acrílico que recebe as fatias de concreto. Após isto, as bolachas são retiradas de dentro do dessecador, secas com um pano, e coladas com adesivo selante a base de poliuretano (PU) na cavidade dos acrílicos. Nesta etapa deve se ter cuidado para colocar duas células de acrílico com a cor do borne diferente, pois uma é o lado positivo (vermelho) e a outra o lado negativo (preto).

Com as bolachas fixadas nos acrílicos, são adicionadas as soluções que servem para se ter o movimento iônico desejado. No lado positivo, a solução usada como ânodo é de NaOH 0,3N (1,2 g / 100 ml) e, no lado negativo, a solução usada como cátodo é NaCl a 3% (3 g / 100 ml). Por fim, as células são ligadas à fonte com voltagem de  $60 \pm 0,1$  V, e a cada 30 min são anotadas a corrente passante no momento em cada célula em um total de 6 h de duração de ensaio. A montagem das células acrílicas no circuito é possível verificar no croqui da figura 15, e o ensaio em andamento na figura 16. Com estes dados anotados é possível calcular a carga passada pelo concreto em Coulombs através das fórmulas 4 e 5, e verificar através da tabela 7 a penetração de íons cloreto na amostra.

Figura 15 – Croqui das ligações elétricas do ensaio de cloretos



(fonte: FEDUMENTI, 2013)

Figura 16 – Ensaio de penetração de cloretos em andamento



(fonte: foto tirada pelo autor)

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

Q = carga total passante [Coulombs];

 $I_0$  = corrente imediatamente após a diferença de potencial ser aplicada [Amperes]; $I_t$  = corrente em t minutos depois da diferença de potencial ser aplicada [Amperes].

$$Q_s = Q_x (95/x)^2 \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

 $Q_s$  = carga total passante em um corpo de prova de 95 mm [Coulombs]; $Q_x$  = carga total passante em um corpo de prova de x mm [Coulombs];

x = diâmetro do corpo de prova [mm].

Tabela 7 – Penetração de íons cloreto em função da carga total passante

Carga passante (Coulombs)	Penetração de íons cloreto
>4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito baixa
<100	Desprezível

(fonte: AMERICAN SOCIETY OF FOR TESTING AND MATERIALS, 2012)

#### 5.4.5 Ensaio de carbonatação acelerada

Para o ensaio de carbonatação acelerada foram utilizados corpos de prova prismáticos com as medidas de 10 cm x 10 cm x 35 cm. Foi escolhido este formato pelo fato de ser o mais usual neste tipo de ensaio, possibilitando assim maior facilidade na comparação dos resultados com outros trabalhos. Além disto, estudos revelam que em corpos de prova cilíndricos, os vetores de penetração de CO<sub>2</sub> acabam se somando, causando uma maior profundidade de carbonatação, o que não ocorre em vigas e pilares com faces planas. O ensaio foi efetuado no Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (LMC/UNISINOS), em São Leopoldo, pois a câmara de carbonatação do LAMTAC estava com problemas de funcionamento.

Este ensaio serve para verificar os níveis de absorção de CO<sub>2</sub> nos diferentes tipos de concreto utilizados. Para isto, os corpos de prova são colocados dentro de uma câmara fechada onde é inserido gás carbônico com taxas de concentração mais elevadas do que as encontradas normalmente na atmosfera. Na figura 17 é possível observar os CPs dentro da câmara de carbonatação, com  $T = 21 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $UR = 70\% \pm 5\%$ . Neste trabalho foi empregado um teor de 5% de CO<sub>2</sub>, pois estudos relatam que valores muito elevados podem provocar distorções nos resultados. Este valor foi aproximado pelo fato de haver o sensor digital para identificar a concentração exata dentro da câmara. Para este número, foi utilizado o volume da câmara, retirado o volume dos corpos de prova e então calculado o volume necessário de CO<sub>2</sub> puro para que se chegasse à concentração requerida.

O tempo de exposição ao gás carbônico pode variar de acordo com cada pesquisa, sendo que para este trabalho foi escolhido o tempo de duas semanas dentro da câmara de carbonatação. Outro dado importante é que os corpos de prova foram ensaiados após 180 dias de cura dentro da câmara úmida.

Figura 17 – Concretos dentro da câmara de carbonatação



(fonte: foto tirada pelo autor)

Após 14 dias, os corpos de prova foram retirados da exposição ao  $\text{CO}_2$  e quebrados uma parte por uma prensa, com o intuito de se obter uma superfície mais plana possível, facilitando a leitura. Em seguida, é borrifada uma solução de fenolftaleína na concentração de 1% sobre o concreto, tornando possível a visualização das partes que foram carbonatadas. Isto ocorre pelo fato de a fenolftaleína ser um indicador de pH, que ao entrar em contato com o concreto não carbonatado, que possui pH acima de 10, adquire uma coloração carmin. Já a parte que foi carbonatada e teve seu pH reduzido para a faixa entre 8,2 e 9,8, acaba fazendo com que esta substância permaneça incolor. Com as zonas de carbonatação aparentes, são feitas duas medidas em cada face do corpo de prova e posteriormente a média de profundidade de carbonatação de cada um.

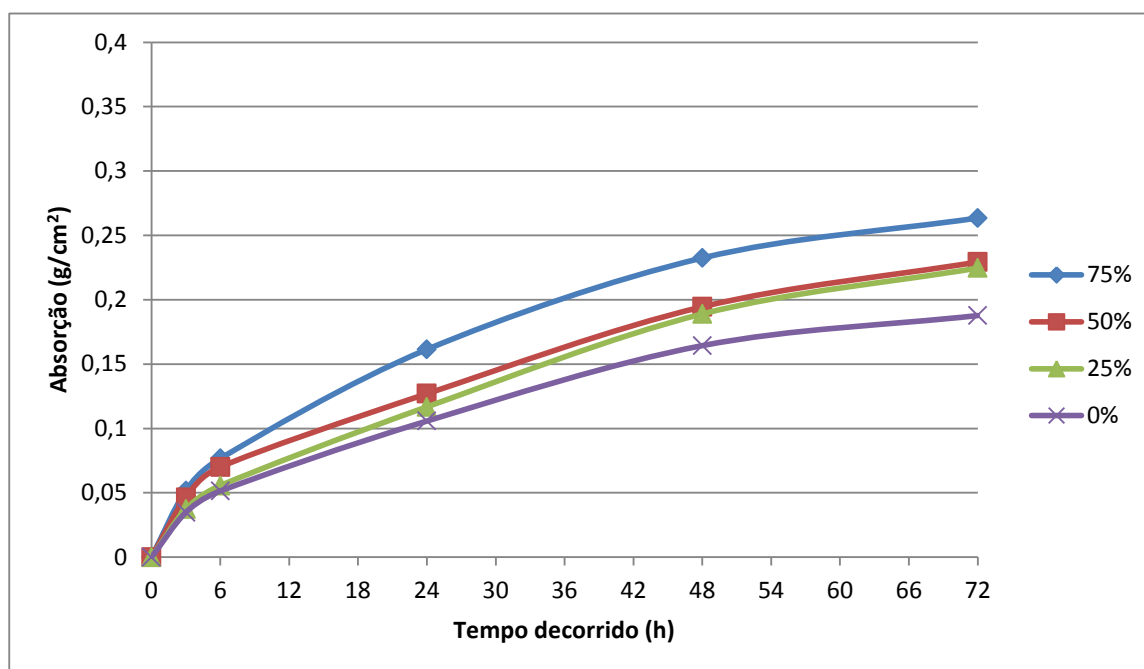
## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, assim como as suas análises.

### 6.1 ABSORÇÃO CAPILAR

A absorção capilar do concreto está diretamente ligada à sua porosidade, ou seja, quanto mais poroso é o concreto, maior será a sua absorção. Outro fator que influencia na absorção são as microfissuras internas, que quanto maior a sua presença, maior será a absorção do concreto. Os resultados deste ensaio estão de acordo com estes fatores, sendo que o concreto mais rico (1:3,5), de menor relação a/c, foi o que menos absorveu água e o concreto mais pobre (1:6,5), de maior relação a/c, foi o que mais absorveu. Nos gráficos das figuras 18, 19 e 20, é possível observar as curvas de absorção dos concretos ao longo do tempo, com diferentes teores de substituição do agregado graúdo.

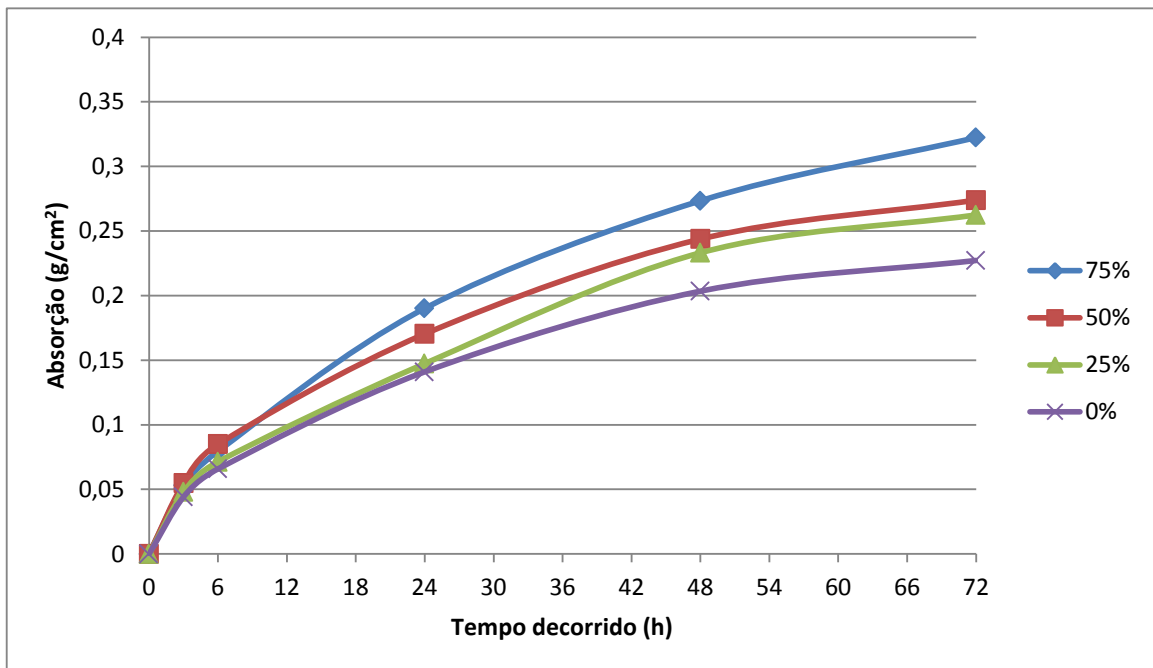
Figura 18 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:3,5 ( $a/c = 0,4$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

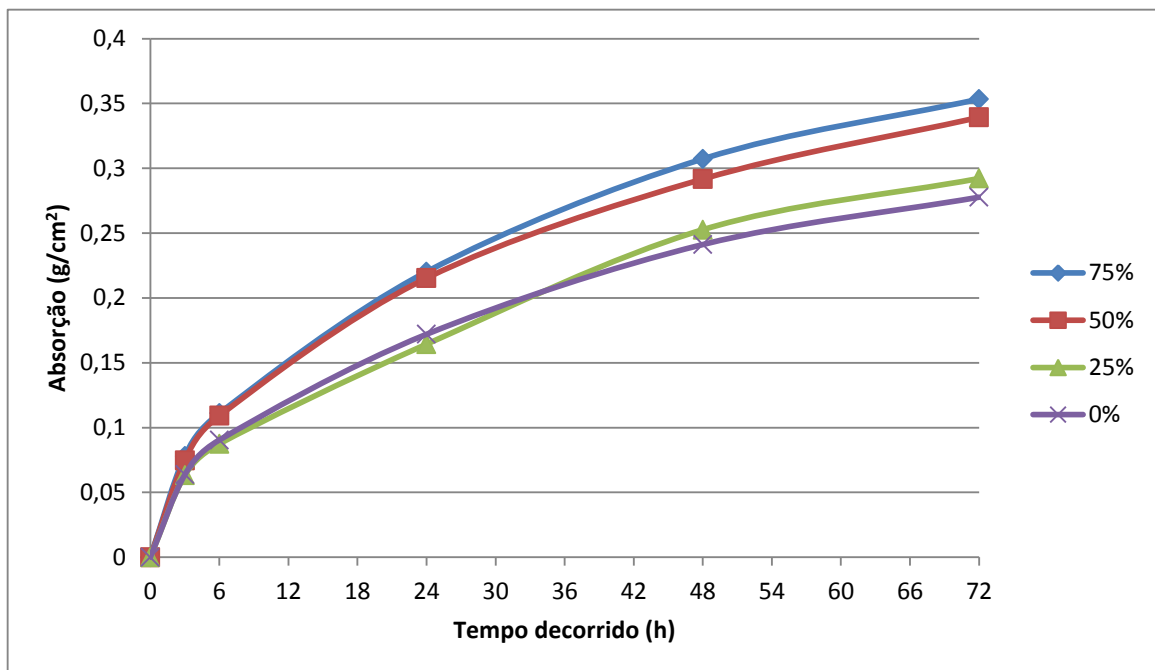


Figura 19 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:5 ( $a/c = 0,5$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Curvas de absorção para concretos com traço 1:6,5 ( $a/c = 0,6$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

Através destes gráficos é possível notar o aumento da absorção do concreto com o aumento do uso de agregado reciclado. Além disto, percebe-se que, com o aumento da relação  $a/c$ , o

concreto com teor de substituição 50% apresenta resultados mais próximos do concreto com 75% de substituição, enquanto os concretos com teor de 25% se aproximam mais da absorção verificada nos concretos referência. Porém, para se ter um resultado mais confiável, os dados obtidos no ensaio foram tratados estatisticamente, para serem eliminados os valores espúrios que podem afetar o resultado final. Para isto, foi determinada a aceitação de valores em um intervalo compreendido entre a média mais ou menos um desvio padrão. Na tabela 8 estão apresentados os valores finais já tratados e no APÊNDICE B podem ser verificados todos os dados obtidos.

Tabela 8 – Valores médios de absorção capilar para concretos com 90 dias de cura

<b>Absorção por capilaridade</b>				
<b>Identificação</b>	<b>Traços</b>	<b>Teor de subst. (%)</b>	<b>Absorção média (g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
A1	1:3,5	0	0,1599	14,1
A2	1:3,5	25	0,2121	6,4
A3	1:3,5	50	0,2427	4,8
A4	1:3,5	75	0,2498	1,6
B1	1:5	0	0,2459	7,3
B2	1:5	25	0,2892	4,3
B3	1:5	50	0,2968	6,7
B4	1:5	75	0,3112	3,5
C1	1:6,5	0	0,2535	7,1
C2	1:6,5	25	0,3089	5,5
C3	1:6,5	50	0,3172	6,8
C4	1:6,5	75	0,3352	0,9

(fonte: elaborado pelo autor)

Com os valores espúrios retirados, os dados foram analisados pelo método de análise fatorial de variância, através da tabela ANOVA, no qual é possível verificar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta. Através deste método também é possível analisar individualmente os fatores ou combinados entre si, determinando a significância dos resultados. A confiabilidade utilizada no método é de 95% e os resultados são dispostos na tabela 9.

Tabela 9 – Análise de variância do ensaio de absorção capilar

	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média Quadrática</b>	<b>Valor calculado de F</b>	<b>Nível de Significância</b>	<b>Significativo</b>
<b>Traço</b>	2	0,0171	70,005	0,0000	Sim
<b>Teor de substituição</b>	3	0,0071	29,341	0,0000	Sim
<b>Traço x Teor de substituição</b>	6	0,0001	0,491	0,8029	Não
<b>Erro</b>	12	0,0002			

(fonte: elaborado pelo autor)

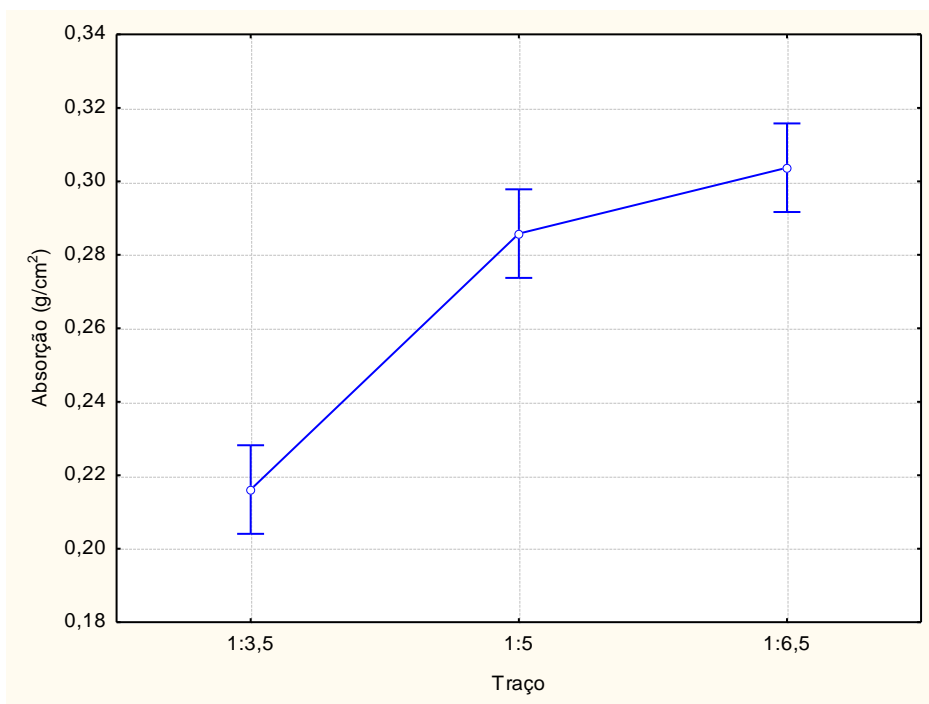
Analisando a tabela 8 é possível perceber que tanto o traço quanto o teor de substituição de agregado graúdo influenciam na absorção do concreto, porém a interação entre estas duas variáveis não causam efeitos de 2ª ordem. A seguir são analisados estes parâmetros.

### 6.1.1 Efeito isolado do traço

O traço do concreto tem influência direta na sua permeabilidade, ou seja, quanto maior for a relação a/c, menor será a porosidade do concreto e conseqüentemente menor será a sua permeabilidade. Sendo assim, o comportamento do concreto no ensaio de absorção capilar é bastante previsível em se tratando de diferenças de traços. Na figura 21 é possível verificar o gráfico gerado a partir dos dados do ensaio depois de serem tratados. Nele observa-se o aumento da absorção do concreto na medida em que o traço vai ficando mais pobre. Este resultado já era esperado, pois é bem conhecido no meio acadêmico (MEHTA; MONTEIRO, 1994, entre outros).

O aumento de absorção do traço rico para o traço médio foi de 32,2% e para o traço pobre foi de 40,5%. Já o aumento entre o traço médio e o traço pobre foi de 6,3%. Os valores médios de absorção dos traços após 72h foram de 0,216 g/cm<sup>2</sup>, 0,286 g/cm<sup>2</sup> e 0,304 g/cm<sup>2</sup>.

Figura 21 – Efeito isolado do traço na absorção capilar



(fonte: elaborado pelo autor)

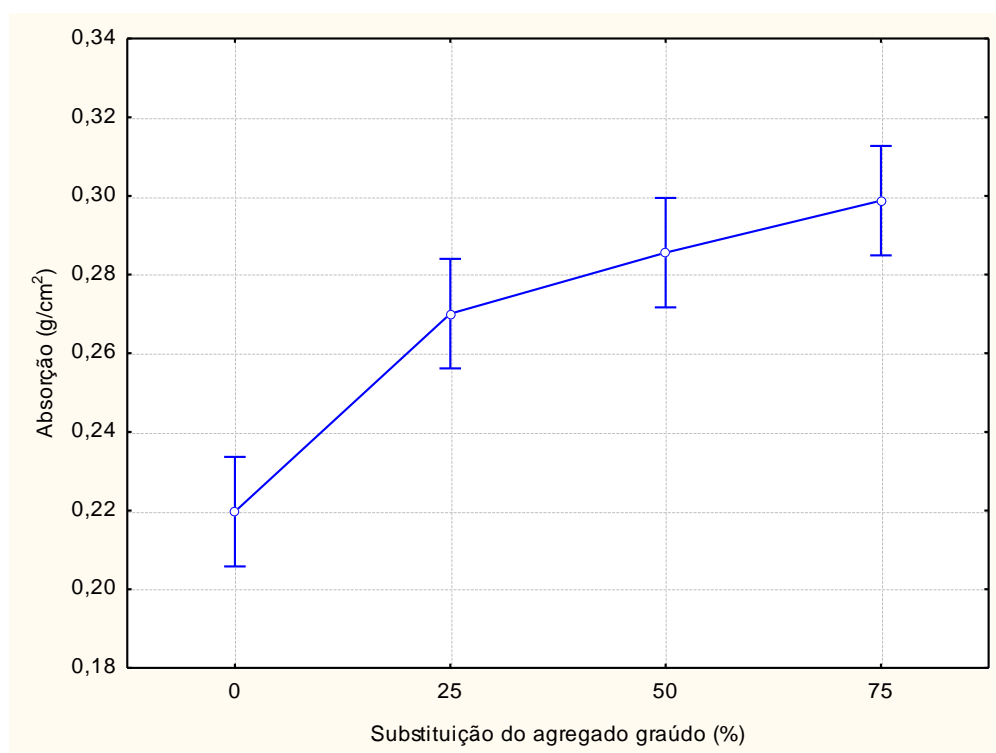
### 6.1.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo

O efeito da substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado vem sendo motivo de estudos já há algum tempo, e são necessários para um melhor entendimento do que ocorre no concreto quando há esta modificação. Há um consenso no meio acadêmico de que os RCD são mais porosos e, conseqüentemente, absorvem mais água que os agregados graúdos naturais. Outro fato é que, o uso destes resíduos dificulta o adensamento na confecção do concreto, o que acaba gerando uma maior quantidade de poros.

Na figura 22 é possível verificar o gráfico gerado com os dados do ensaio depois de serem tratados. Nele observa-se o aumento da absorção do concreto na medida em que o teor de substituição do agregado graúdo aumenta. Os valores médios de absorção dos diferentes

teores de substituição foram de  $0,220 \text{ g/cm}^2$  (0%),  $0,270 \text{ g/cm}^2$  (25%),  $0,286 \text{ g/cm}^2$  (50%) e  $0,299 \text{ g/cm}^2$  (75%). Houve um aumento significativo de 22,9% na absorção do concreto ao se passar do teor de 0% ao teor de 25%, e após, o aumento não foi tão expressivo, sendo de 5,74% para 50% e de 4,61% para 75%. O aumento total foi de 36% entre os teores de 0% e 75%.

Figura 22 – Efeito isolado do teor de substituição na absorção capilar



(fonte: elaborado pelo autor)

Trabalhos realizados anteriormente com a utilização de RCD como agregado graúdo também encontraram aumento na absorção do concreto vinculado ao teor de resíduos utilizado. Fedementi (2013) utilizou diversas combinações para seus concretos, entre elas diferentes teores de RCD, e destacou que, para uma substituição de 50% do agregado natural pelo reciclado, houve um aumento de 4% na absorção do concreto. Já Sagoe-Crentsil<sup>27</sup> et al. (2001 apud LOVATO, 2007) e Troian (2010) revelam em seus trabalhos um aumento de 25% na absorção do concreto com o uso de agregado reciclado em relação ao concreto referência.

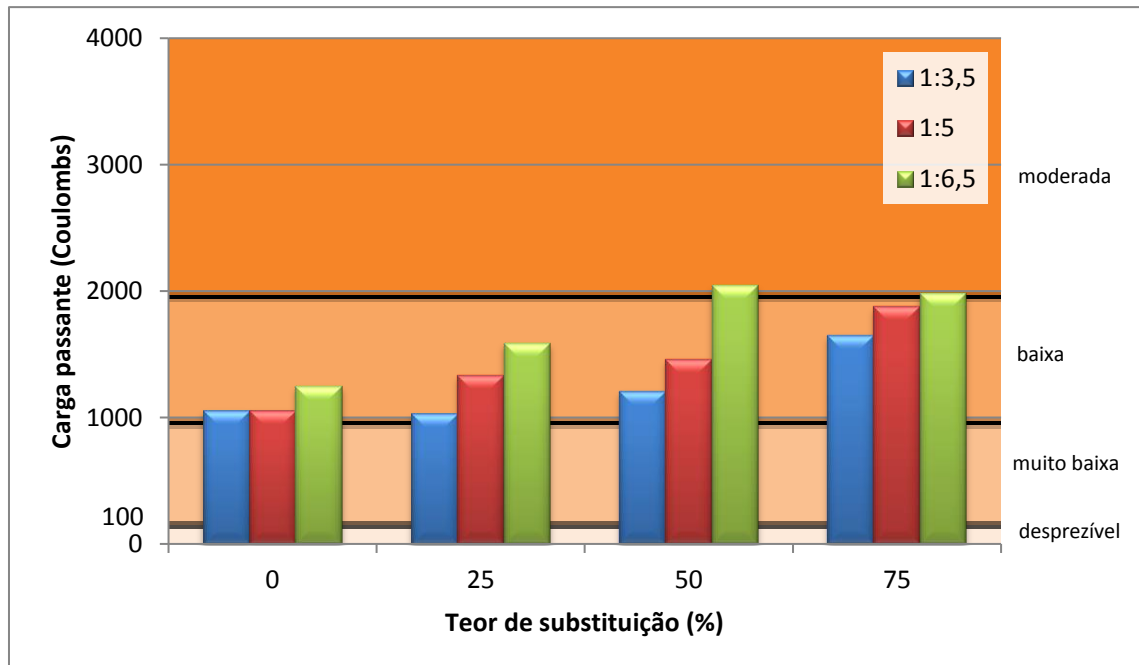
<sup>27</sup> SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n.5, p. 707-712, may 2001.

Estes valores são bem próximos ao deste trabalho e, apesar de não utilizarem exatamente o mesmo tipo de resíduo, demonstram uma concordância de resultados.

## 6.2 PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Conforme já mencionado neste trabalho, o íon cloreto é um dos maiores causadores da corrosão em armaduras das estruturas de concreto armado. Assim como a absorção capilar, a penetrabilidade do concreto está ligada a sua porosidade e presença de microfissuras. Os resultados deste ensaio mostram uma tendência já esperada de aumento da penetrabilidade com o aumento da relação a/c. A partir da figura 23 é possível verificar esta tendência, sendo que o concreto com traço mais rico (1:3,5, a/c = 0,4) obteve uma carga passante menor do que os concretos com traços mais pobres. O concreto com traço de 1:6,5 (a/c = 0,6) obteve a maior penetrabilidade registrada.

Figura 23 – Valores médios da carga passante através dos corpos de prova no ensaio de penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Através do gráfico da figura 20 é possível notar o aumento da penetrabilidade do concreto com o aumento do uso de agregado reciclado. Porém, para se ter um resultado mais confiável,

os dados obtidos no ensaio foram tratados estatisticamente, para serem eliminados os valores espúrios que podem afetar o resultado final. Para isto, foi determinada a aceitação de valores em um intervalo compreendido entre a média mais ou menos um desvio padrão. Na tabela 10 estão apresentados os valores finais já tratados e no APÊNDICE C podem ser verificados todos os dados obtidos.

Sem os valores espúrios, os dados foram analisados pelo método ANOVA, possibilitando verificar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta. Através deste método também é possível analisar as combinações dos fatores, determinando a significância dos resultados. A confiabilidade é de 95% e os resultados são dispostos na tabela 11.

Tabela 10 – Valores médios de penetração para concretos com 180 dias de cura

Penetração de cloretos					
Identificação	Traços	Teor de subst. (%)	Carga passante média (C)	Coefficiente de variação (%)	Penetração de íons cloreto
A1	1:3,5	0	981,6	5,67	Muito baixa
A2	1:3,5	25	1087,2	2,80	Baixa
A3	1:3,5	50	1226,1	0,04	Baixa
A4	1:3,5	75	1705,1	0,78	Baixa
B1	1:5	0	1038,5	1,60	Baixa
B2	1:5	25	1318,7	0,74	Baixa
B3	1:5	50	1385,7	4,14	Baixa
B4	1:5	75	2044,8	3,42	Moderada
C1	1:6,5	0	1275,6	0,04	Baixa
C2	1:6,5	25	1461,2	4,17	Baixa
C3	1:6,5	50	2020,5	0,25	Moderada
C4	1:6,5	75	2092,9	2,95	Moderada

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Análise de variância do ensaio de penetração de cloretos

	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor calculado de F	Nível de Significância	Significativo
<b>Traço</b>	2	431127	254,53	0,0000	Sim
<b>Teor de substituição</b>	3	808600	477,39	0,0000	Sim
<b>Traço x Teor de substituição</b>	6	43783	25,85	0,0000	Sim
<b>Erro</b>	12	1694			

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a tabela 10 é possível perceber que tanto o traço quanto o teor de substituição de agregado graúdo influenciam na absorção do concreto, e também a interação entre estas duas variáveis causam efeitos de 2<sup>a</sup> ordem. A seguir são analisados estes parâmetros.

### 6.2.1 Efeito isolado do traço

A capacidade do concreto em resistir à entrada de fluidos através de seus poros está diretamente ligada à sua relação a/c. Quanto maior a relação a/c, maior será a sua porosidade e, conseqüentemente, menor será a resistência do concreto à entrada de fluidos. No gráfico da figura 24 é possível verificar dados do ensaio depois de serem tratados. Nele observa-se o aumento da carga passante pelo concreto na medida em que o traço vai ficando mais pobre e com maior relação a/c. Este resultado já era esperado, pelos fatos acima citados.

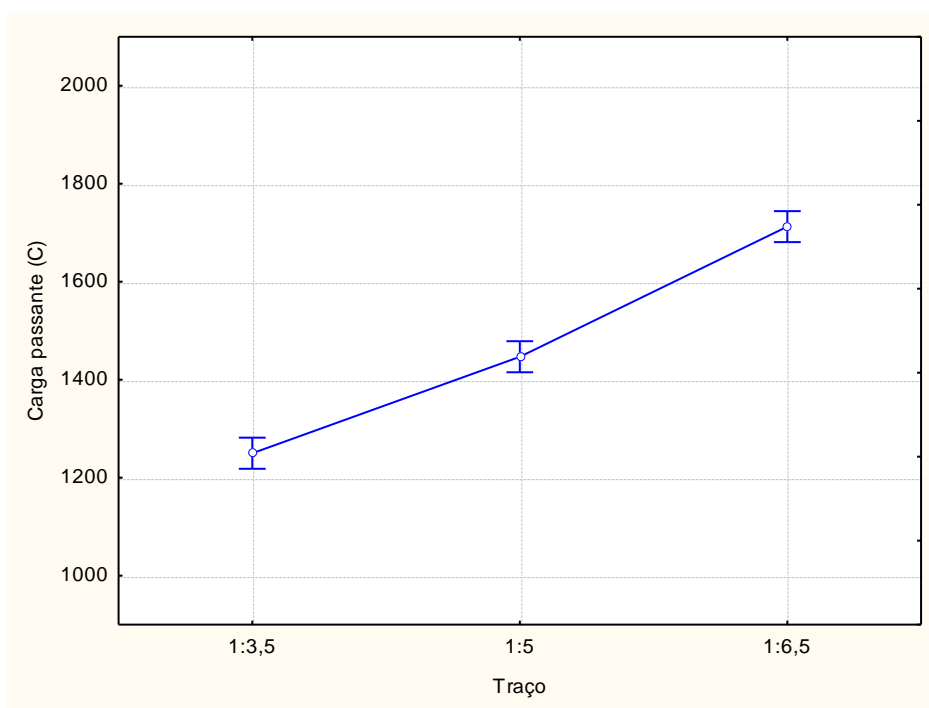
Os valores obtidos em Coulombs para os traços rico, médio e pobre, foram respectivamente de 1250 C, 1447 C e 1713 C. Estes dados representam um aumento de 15,7% na carga passante entre o concreto rico e o médio e de 18,3% entre o médio e o pobre, gerando um aumento total de 37% na carga passante se forem analisados o traço de 1:3,5 e de 1:6,5. Estes dados mostram uma predisposição maior do concreto com relação a/c mais alta em permitir a passagem de íons de cloreto no seu interior. Segundo a tabela da ASTM C1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), com valores entre 1000 C e 2000 C o concreto é considerado de baixa penetrabilidade (dados disponíveis na tabela 7).

Em outras pesquisas, observa-se a mesma tendência de aumento da penetrabilidade com a diminuição do consumo de cimento do concreto. Medeiros et al. (2013) revelam em seu



estudo um aumento de 41,5% da carga total passante em seu concreto referência, feito com cimento CP-V ARI, quando se passa de um traço rico de 1:2,8 para um traço intermediário de 1:4,4. Já Cabral (2007), em sua pesquisa com agregados de RCD, constatou aumentos em torno de 10% na porosidade do concreto ao se aumentar a relação a/c de 0,45 para 0,65, demonstrando a influência do traço e da relação a/c no grau de penetrabilidade do concreto.

Figura 24 – Efeito isolado do traço na penetração de íons cloreto



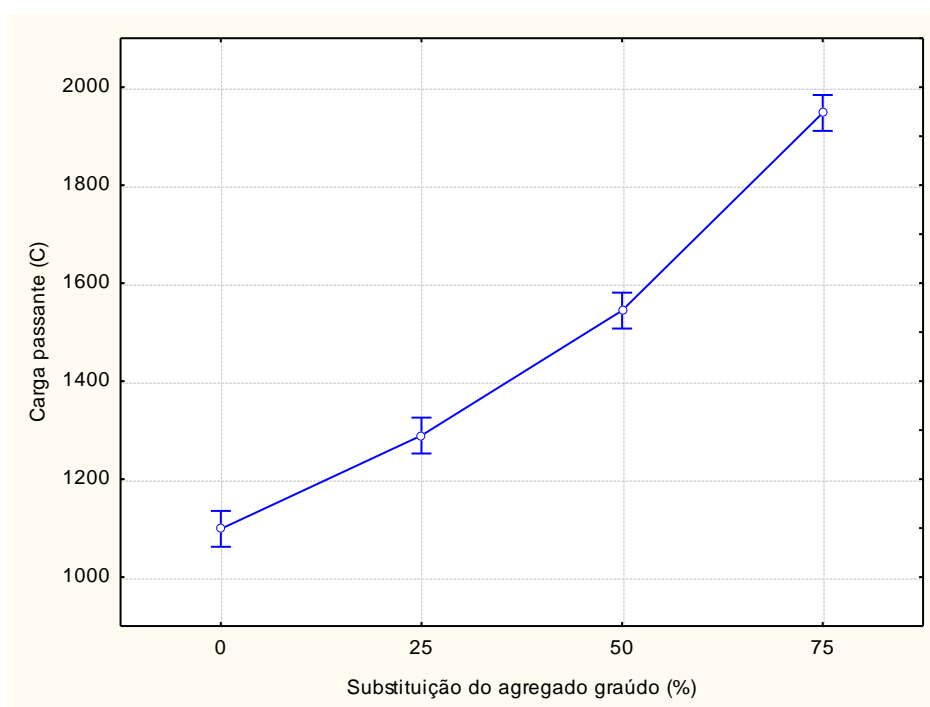
(fonte: elaborado pelo autor)

### 6.2.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo

Assim como o traço, o teor de substituição do agregado graúdo também se mostrou significativa para o aumento da carga passante total, e isto pode ser explicado por três fatores. Um deles é o fato de que o agregado reciclado possui maior porosidade do que o agregado natural, incorporando uma maior penetrabilidade ao concreto. Outra explicação aceita é o fato de o resíduo adquirir microfissuras no processo de reciclagem, o que deixaria o caminho mais livre para a penetração de fluidos no concreto. O terceiro fator, e mais aceito, é o fato de que o aumento no teor de substituição do agregado traz dificuldades ao adensamento do concreto, causando um aumento na porosidade do mesmo.

No gráfico da figura 25 é possível verificar os dados do ensaio depois de serem tratados. Nele observa-se o aumento da carga passante pelo concreto simultaneamente ao acréscimo do teor de agregado reciclado substituído. Os valores médios de carga passante, em Coulombs, foram de 1099 C (0%), 1289 C (25%), 1544 C (50%) e 1947 C (75%). Estes dados representam um aumento de 77,3 % na carga total passante entre o concreto sem resíduos e o com maior teor de substituição, demonstrando a alta significância do teor de substituição na penetrabilidade do concreto.

Figura 25 – Efeito isolado do teor de substituição na penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

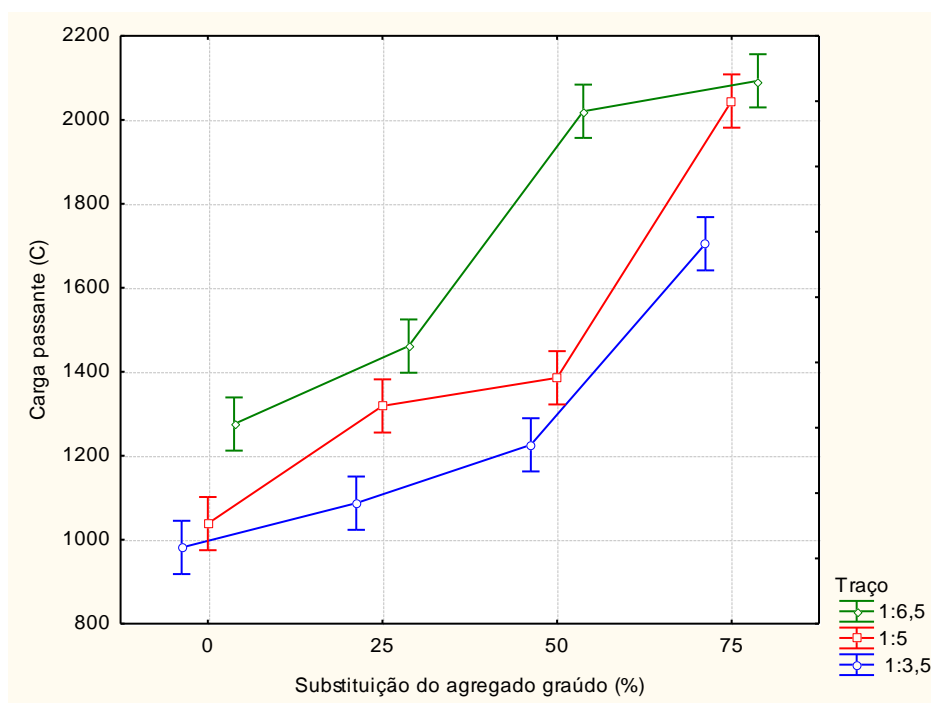
Existem alguns trabalhos publicados que também encontraram esta relação entre a penetrabilidade e o teor de agregados reciclados. Um deles foi publicado por Olorunsogo e Padayachee (2002), onde relatam terem encontrado um aumento de 73,2% na penetrabilidade de cloretos em concretos com alto teor de agregado reciclado quando comparados aos seus concretos referência. Outra pesquisa, efetuada por Troian (2010), relata aumento significativo da penetrabilidade de íons cloreto em seus concretos confeccionados com resíduos reciclados de concreto. Ela relata aumento médio de 52,4% na carga total passante em concretos com 100% de teor de agregado reciclado quando comparados aos concretos com 25% de teor de substituição. Estes dados são relativos a uma relação a/c média de 0,64 e resistência à

compressão do RCD de 50 MPa. Estes dois trabalhos ajudam a demonstrar a influência que o teor de substituição do agregado provoca em se tratando de penetrabilidade do concreto.

### 6.2.3 Efeito combinado do traço e do teor de substituição

No gráfico da figura 26 é possível visualizar o efeito combinado entre o traço e o teor de substituição do agregado graúdo em relação à carga passante.

Figura 26 – Efeito combinado do traço e do teor de substituição na penetração de íons cloreto



(fonte: elaborado pelo autor)

É possível observar que os três maiores valores de carga passante estão acima de 2000 C, o que torna moderada a penetração de íons cloretos nestes concretos, com valores de 2020 C e 2092 C para o traço de 1:6,5 (50% e 75%) e 2044 C para o traço de 1:5 (75%). Já o traço 1:3,5 possui um resultado de muito baixa penetrabilidade de íons cloreto (<1000 C), o do concreto elaborado sem substituição do agregado graúdo, com 981,6 C. O restante dos concretos ensaiados estão na faixa entre 1000 C e 2000 C, considerados de baixa penetrabilidade de íons cloretos.

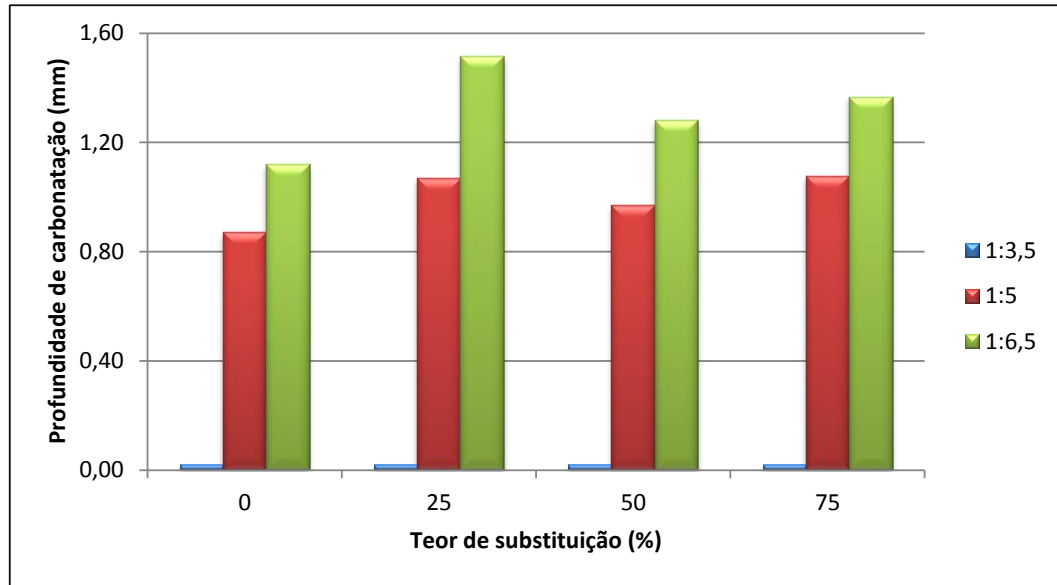
É possível observar que os três traços possuem um trecho de grande aumento da carga passante em uma das faixas de troca de teor de substituição, sendo o restante das curvas com aumentos menos significativos e semelhantes entre si. Os maiores aumentos são de 38,3% no traço 1:6,5 entre os teores de 25% e 50%, de 47,6% no traço de 1:5 entre os teores de 50% e 75% e de 39,1% no mesmo intervalo do traço 1:3,5.

Uma das explicações plausíveis para esta ocorrência é o fato de que, com uma argamassa mais rica ao redor dos agregados graúdos, os traços de 1:3,5 e 1:5 dificultam a passagem de fluidos até chegarem ao agregados reciclados, onde encontram menor resistência para passar. Nestes traços, um baixo teor de substituição do agregado graúdo não acarreta um grande aumento na passagem dos íons, como demonstrado no gráfico, porém se o teor de substituição for maior que 50%, o aumento na penetrabilidade se torna bem acentuado. Já em uma argamassa mais pobre (1:6,5), os fluidos chegam aos agregados mais facilmente, fazendo com que uma menor quantidade de teor de substituição já seja suficiente para a penetrabilidade aumentar consideravelmente.

### 6.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A profundidade de carbonatação do concreto está diretamente ligada a sua porosidade, ou seja, quanto mais poroso é o concreto, maior será a sua carbonatação. Os resultados deste ensaio estão de acordo com estes fatores, sendo que após 14 dias carbonatando, no concreto mais rico ( $a/c = 0,4$ ) não foi possível verificar carbonatação, o que já era previsto, visto que este teor de  $a/c$  está abaixo do teor crítico, entre 0,45 e 0,5, mencionado em algumas bibliografias, como Kulakowski (2002) e Venquiaruto et al. (2001). Já do concreto intermediário ( $a/c = 0,5$ ) para o concreto pobre ( $a/c = 0,6$ ) houve aumento médio de 30%. Em se tratando do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, não foi possível verificar um padrão de comportamento. Os dados do ensaio apresentam um aumento na carbonatação entre os concretos com teores de substituição de 0% para 25%. Já nos concretos com teores de 50% e 75%, há um declínio na carbonatação. Na figura 27 é possível observar o gráfico elaborado a partir dos dados obtidos no ensaio.

Figura 27 – Valores médios da profundidade de carbonatação em concretos com 180 dias de cura e 14 dias em câmara CO<sub>2</sub> à 5%



(fonte: elaborado pelo autor)

Pelo fato de o ensaio ter durado, por problemas técnicos, apenas 14 dias, as profundidades de carbonatação observadas foram muito baixas. Sendo assim, não é possível determinar se este será o comportamento da carbonatação no concreto após um período maior de exposição. Além disto, em alguns traços só foi possível obter apenas um corpo de prova prismático para fazer o ensaio, fazendo com que o resultado possa ter uma grande variação. Por estes motivos, foi decidido que não é tecnicamente necessário ser feito um tratamento estatístico dos dados. Na tabela 12 são apresentados os valores médios obtidos no ensaio de carbonatação.

Tabela 12 – Valores médios de carbonatação para concretos com 180 dias de cura

<b>Carbonatação</b>			
<b>Identificação</b>	<b>Traços</b>	<b>Teor de subst. (%)</b>	<b>Carbonatação média (mm)</b>
A1	1:3,5	0	<0,5
A2	1:3,5	25	<0,5
A3	1:3,5	50	<0,5
A4	1:3,5	75	<0,5
B1	1:5	0	0,87
B2	1:5	25	1,07
B3	1:5	50	0,97
B4	1:5	75	1,10
C1	1:6,5	0	1,12
C2	1:6,5	25	1,52
C3	1:6,5	50	1,28
C4	1:6,5	75	1,30

(fonte: elaborado pelo autor)

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de analisar a durabilidade de concretos confeccionados com agregado graúdo reciclado, foram realizados ensaios de absorção capilar, penetração de cloretos e carbonatação. Para as análises, foram definidos três traços para o concreto, 1:3,5, 1:5 e 1,6,5, além dos seguintes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado: 0%, 25% 50% e 75%. O abatimento dos concretos foi fixado em  $100 \pm 20$  mm e os dados de respostas foram tratados estatisticamente com intervalo de confiança de 95%.

Através destes ensaios, foi possível verificar a influência dos resíduos reciclados no concreto. No ensaio de absorção capilar a absorção média para um concreto com 0% no teor de substituição do agregado graúdo foi de  $0,220 \text{ g/cm}^2$ , tendo um  $f_{cm}$  médio de 33,6 MPa, já para o concreto com teor de substituição de 75% há um aumento médio de 36% na absorção, indo para  $0,299 \text{ g/cm}^2$  e com  $f_{cm}$  médio de 31,4 MPa. Em se tratando somente do teor de resíduos no concreto, percebe-se um leve declínio na resistência, o que não influenciaria no projeto no qual este concreto esteja sendo usado, porém, é necessário levar em consideração o aumento da absorção, que inviabilizaria o uso do mesmo em certos casos. Já se for levado em consideração os três diferentes traços do concreto, é percebido um aumento de 40,5% na absorção média da água entre o concreto mais rico e o mais pobre, sendo os valores de  $0,216 \text{ g/cm}^2$  e  $0,304 \text{ g/cm}^2$  respectivamente, sendo o  $f_{cm}$  de 42,2 MPa para o concreto de 1:3,5 e de 24,73 MPa para o traço de 1:6,5. Este aumento na absorção entre traços pobres e ricos já era esperado, pelo fato de um concreto mais pobre ser também mais poroso.

Em relação à penetração de íons cloretos, foi possível verificar o aumento da carga passante em relação ao teor de agregado reciclado utilizado. Ao serem comparados os concretos com teor de substituição de 0% e 75%, há um aumento médio de 77,3% na carga passante do concreto com maior quantidade de RCD. Este número é significativo, pois, em alguns casos, fez com que o concreto passasse de muito baixa ou baixa penetrabilidade, para moderada penetrabilidade, gerando uma maior preocupação em relação à corrosão do aço da armadura. Quando utilizado um concreto com resistência média de 42,2 MPa, o aumento máximo na penetrabilidade foi de 74%, já para um concreto com  $f_{cm}$  de 31,4 MPa, o aumento chegou à 97%, ou seja, a penetrabilidade dobrou com o uso de 75% de RCD como agregado graúdo.

Este grande aumento é um número preocupante e, de certa forma, inviabiliza a utilização de grandes teores de agregado reciclado em concretos armados. Porém, para teores menores de substituição, o aumento médio não foi tão grande, como de 17% entre concretos com 0% e 25% de substituição. Um fato interessante é que, ao ser analisado o teor de substituição juntamente com o traço, nota-se que para o traço mais pobre, há um aumento considerável na penetrabilidade entre 25% e 50% de substituição, já para os traços médio e rico, o maior aumento acontece entre 50% e 75% de substituição.

Em relação ao ensaio de carbonatação, pelo fato do concreto ter ficado apenas 14 dias carbonatando, não é possível se chegar a um padrão comportamental em relação ao teor de substituição do agregado graúdo. Foi possível verificar um aumento na carbonatação ao se comparar o concreto com teor de substituição de 25% ao concreto referência. Já para os demais teores, de 50% e 75%, houve um leve declínio na profundidade carbonatada em comparação ao de 25%. Para se ter resultados mais conclusivos, é necessário realizar o ensaio por um período maior. Em se tratando do traço do concreto, ou da relação a/c, foi possível verificar ausência de carbonatação no traço 1:3,5, e uma maior profundidade de área carbonatada para o traço 1:6,5 em comparação ao traço 1:5, o que já era esperado, pelo fato de que concretos com maior relação a/c são mais porosos, sendo mais suscetíveis à carbonatação.

Através desta verificação é possível estipular que, para concretos com  $f_{cm}$  inferior a 25 MPa, o teor ideal de substituição de agregados naturais pelo reciclado de concreto com fibra de PP é de até 25%, já para concretos mais resistentes, com  $f_{cm}$  entre 30 MPa e 40 MPa, o teor de 50% de substituição ainda se mostra satisfatório.



## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete`s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, USA, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, A. G. de. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. 2008.
- BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, abr./jun. 2013.
- CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V. de; BRUM, I. A. S. de; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V.; COSTA, D. B. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. de (Org.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. p. 142-187.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 9 nov. 2013.
- CORDEIRO, L de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORSINI, R. Ambientes agressivos: projetos de estruturas de concreto expostas a ambientes quimicamente agressivos exigem atenção especial para assegurar desempenho e vida útil à edificação. **Téchné**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, v. 21, n.196, p. 36-39, jul. 2013. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/196/artigo294033-4.aspx>>. Acesso em 20 out. 2014

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

FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão**. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

HANSEN, T. C. (Ed.). **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman e Hall, 1992. Rilem Report 6.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concretos**. São Paulo: Pini, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estatísticas do século XX**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/29092003estatisticasecxxhtml.shtm>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

\_\_\_\_\_. **Países@**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/paisesat/main\\_frameset.php](http://www.ibge.gov.br/paisesat/main_frameset.php)><sup>28</sup>. Acesso em: 3 nov. 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docente) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KARPINSKI, L. A.; PANDOLFO, A.; REINEHER, R.; KUREK, J.; PANDOLFO, L. M.; GUIMARÃES, J. C. B. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil**: uma abordagem ambiental. Porto Alegre: Edipucrs, 2009.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo de carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

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

<sup>28</sup> Estando no site <[http://www.ibge.gov.br/paisesat/main\\_frameset.php](http://www.ibge.gov.br/paisesat/main_frameset.php)>, localize o Brasil no mapa e clique. Ao abrir uma nova janela, localize na parte de cima da página e clique na indicação <população>.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Reciclagem de entulhos na construção civil e a solução política e ecologicamente correta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS DE ARGAMASSA, 1., 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBTA, 1995, p. 315-325. Disponível em: <<http://www.abrecon.com.br/Conteudo/7/Entulho.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

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

MEDEIROS, M. H. F. de; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Engenharia Civil**, v. 66, n. 1, p. 59-65, jan./mar. 2013

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179-185, Feb. 2002.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

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

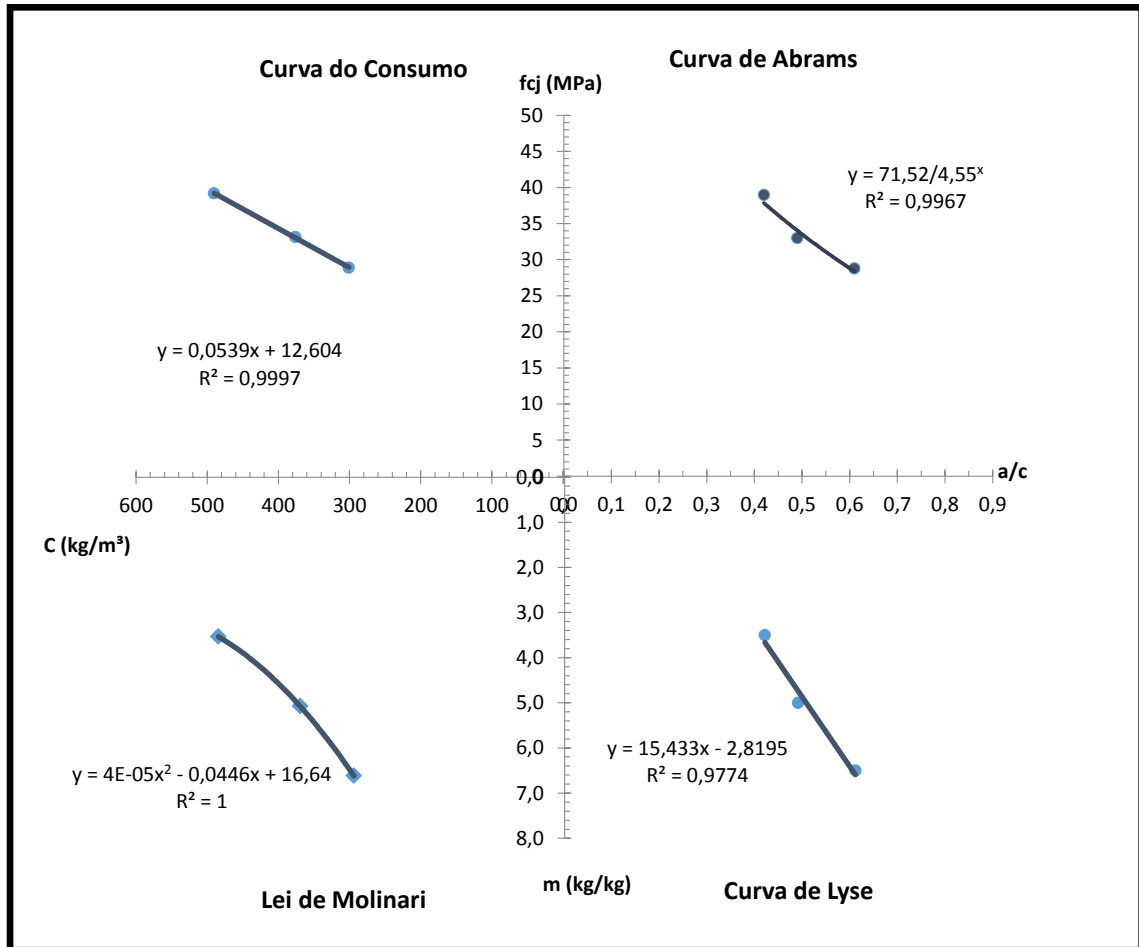
VENQUIARUTO, S. D.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. A Influência do teor e da quantidade de adições minerais na carbonatação do concreto. In: 43. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2001, Foz-do-Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1v. (cd), 14p.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloretos em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZITTO, I. **Avaliação do desempenho mecânico de concretos confeccionados com agregados graúdos de resíduos de concreto branco de alto desempenho com fibras.** 2014. 98 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

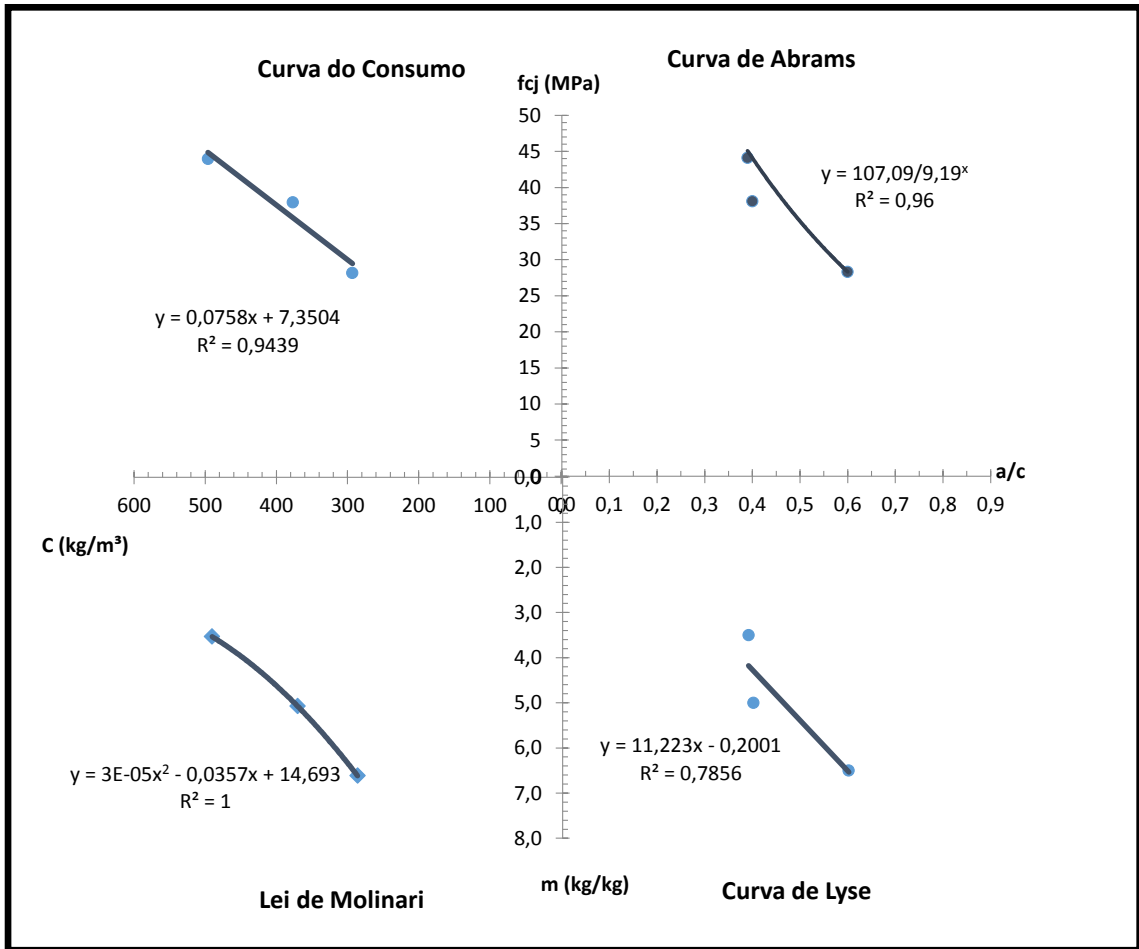
ZVEIBIL, V. Z. (Coord.). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

**APÊNDICE A – Diagramas de dosagem para teores de substituição de  
agregado graúdo de 0%, 25% e 50%**

Figura APA1 – Diagrama de dosagem para teor de substituição de 0% ( $\alpha = 53\%$ )

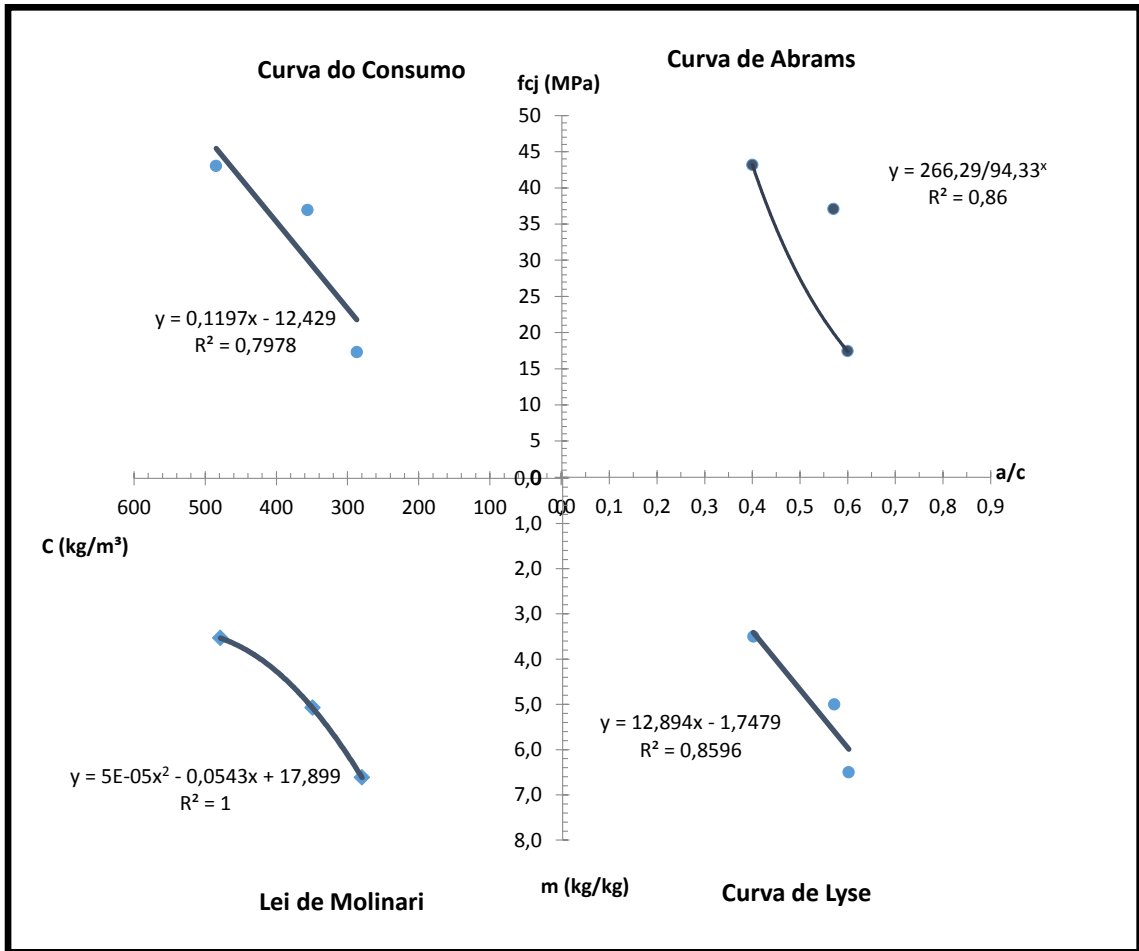
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura APA2 – Diagrama de dosagem para teor de substituição de 25% ( $\alpha = 54\%$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura APA3 – Diagrama de dosagem para teor de substituição de 50% ( $\alpha = 55\%$ )



(fonte: elaborado pelo autor)

## **APÊNDICE B – Tratamento dos dados do ensaio de absorção capilar**



APB – Tratamento de dados do ensaio de absorção capilar

Nome	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )	Média	Desvio Padrão	Intervalo	Variância	Dados Tratados	Nova média
<b>A1a</b>	0,2433	0,188	0,0507	0,238	0,0026		0,1599
<b>A1b</b>	0,1758					0,1758	
<b>A1c</b>	0,1439			0,137		0,1439	
<b>A2a</b>	0,2497	0,225	0,0237	0,248	0,0006		0,2121
<b>A2b</b>	0,2217					0,2217	
<b>A2c</b>	0,2025			0,201		0,2025	
<b>A3a</b>	0,2344	0,229	0,0246	0,254	0,0006	0,2344	0,2427
<b>A3b</b>	0,2025						
<b>A3c</b>	0,2510			0,205		0,2510	
<b>A4a</b>	0,2527	0,263	0,0238	0,287	0,0006	0,2527	0,2498
<b>A4b</b>	0,2908						
<b>A4c</b>	0,2470			0,240		0,2470	
<b>B1a</b>	0,2331	0,227	0,0348	0,262	0,0012	0,2331	0,2459
<b>B1b</b>	0,2586						
<b>B1c</b>	0,1898			0,192			
<b>B2a</b>	0,2803	0,262	0,0472	0,310	0,0022	0,2803	0,2892
<b>B2b</b>	0,2981						
<b>B2c</b>	0,2089			0,215			
<b>B3a</b>	0,2280	0,274	0,0421	0,316	0,0018		0,2968
<b>B3b</b>	0,2828					0,2828	
<b>B3c</b>	0,3108			0,232		0,3108	
<b>B4a</b>	0,3190	0,322	0,0207	0,343	0,0004	0,3190	0,3112
<b>B4b</b>	0,3444						
<b>B4c</b>	0,3035			0,302		0,3035	

continua

continuação

Nome	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )	Média	Desvio Padrão	Intervalo	Variância	Dados Tratados	Nova média
<b>C1a</b>	0,2662	0,278	0,0438	0,322	0,0019	0,2662	0,2535
<b>C1b</b>	0,3261						
<b>C1c</b>	0,2408			0,234		0,2408	
<b>C2a</b>	0,3210	0,292	0,0315	0,324	0,0010	0,3210	0,3089
<b>C2b</b>	0,2586						
<b>C2c</b>	0,2968			0,261		0,2968	
<b>C3a</b>	0,3325	0,339	0,0412	0,380	0,0017	0,3325	0,3172
<b>C3b</b>	0,3019						
<b>C3c</b>	0,3834			0,298			
<b>C4a</b>	0,3374	0,353	0,0314	0,385	0,0010	0,3374	0,3352
<b>C4b</b>	0,3896						
<b>C4c</b>	0,3331			0,322		0,3331	

(fonte: elaborado pelo autor)

## **APÊNDICE C – Tratamento dos dados do ensaio de penetração de cloretos**

APC – Tratamento de dados do ensaio de penetração de cloretos

Nome	Corrente Passante (C)	Média	Desvio Padrão	Intervalo	Variância	Dados Tratados	Nova média
A1a	1021,00	1059,72	140,9	1200,63	19856,1	1021,00	981,60
A1b	1215,94						
A1c	942,21			918,80		942,21	
A2a	933,28	1035,89	91,4	1127,33	8360,6		1087,20
A2b	1065,67					1065,67	
A2c	1108,72			944,45		1108,72	
A3a	1178,57	1210,25	27,4	1237,69	752,8		1226,09
A3b	1226,50					1226,50	
A3c	1225,69			1182,82		1225,69	
A4a	1695,60	1652,40	91,7	1744,08	8405,4	1695,60	1705,05
A4b	1714,50					1714,50	
A4c	1547,10			1560,72			
B1a	1050,24	1058,63	36,9	1095,50	1359,3	1050,24	1038,46
B1b	1026,68					1026,68	
B1c	1098,97			1021,76			
B2a	1311,78	1338,86	35,6	1374,47	1268,3	1311,78	1318,69
B2b	1325,59					1325,59	
B2c	1379,20			1303,25			
B3a	1345,09	1461,51	137,4	1598,95	18890,8	1345,09	1385,70
B3b	1613,13						
B3c	1426,31			1324,06		1426,31	
B4a	1547,10	1878,90	291,6	2170,48	85018,7		2044,80
B4b	2094,30					2094,30	
B4c	1995,30			1587,32		1995,30	

continua

continuação

Nome	Corrente Passante (C)	Média	Desvio Padrão	Intervalo	Variância	Dados Tratados	Nova média
<b>C1a</b>	1276,04	1249,78	44,8	1294,57	2005,9	1276,04	1275,64
<b>C1b</b>	1198,07						
<b>C1c</b>	1275,23			1205,00		1275,23	
<b>C2a</b>	1418,19	1587,41	222,7	1810,14	49609,5	1418,19	1461,24
<b>C2b</b>	1504,29						
<b>C2c</b>	1839,75			1364,68			
<b>C3a</b>	2016,82	2045,25	43,1	2088,31	1854,6	2016,82	2020,47
<b>C3b</b>	2094,79						
<b>C3c</b>	2024,13			2002,18		2024,13	
<b>C4a</b>	1769,40	1985,10	191,8	2176,93	36800,2		2092,95
<b>C4b</b>	2049,30						
<b>C4c</b>	2136,60			1793,27		2136,60	

(fonte: elaborado pelo autor)