

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

**Allan Silveira Baptista**

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUO DE PÓ DE ROLAGEM DE  
ÁGATA COMO SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO DE  
CALCÁRIO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Porto Alegre  
Julho 2017

**ALLAN SILVEIRA BAPTISTA**

**INFLUÊNCIA DO USO DO RESÍDUO DE PÓ DE ROLAGEM  
DE ÁGATA COMO SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO  
DE CALCÁRIO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
BRANCO**

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: Angela Borges Masuero**  
**Coorientadora: Natália dos Santos Petry**

Porto Alegre

Julho 2017

**ALLAN SILVEIRA BAPTISTA**

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUO DE PÓ DE ROLAGEM  
DE ÁGATA COMO SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO  
DE CALCÁRIO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
BRANCO**

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 Professora Relatora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2017

Prof.a Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Prof.a Natália dos Santos Petry  
Doutoranda pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Ana Paula Kirchheim  
Dra. pela UFRGS  
Relatora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.a Angela Borges Masuero**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Prof.a Ana Paula Kirchheim**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Prof.a Natália dos Santos Petry**  
**(UFRGS)**  
Doutoranda pela UFRGS

**Prof. Márlon Longhi**  
**(UNIVATES)**  
Doutorando pela UFRGS

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Cicero Luiz Lemos Baptista e Geíza Silveira Baptista, e meu irmão Raphael Silveira Baptista por todo apoio e afeto que me forneceram, não apenas no período de graduação, como também durante toda minha vida.

Agradeço à professora Angela Borges Masuero, orientadora deste trabalho e mentora durante meu período de graduação, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e aconselhamentos a que me foram confiados.

À professora Natalia Petry, agradeço por todo empenho na organização, discussão e realização deste trabalho.

Ao Guilherme Hoehr Trindade, grande pessoa que conheci na época da iniciação científica, agradeço pela paciência, amizade e ensinamentos transmitidos quando trabalhamos em conjunto nos mais diversos projetos.

Agradeço à minha namorada, Cellina Peixoto, pelo amor e companheirismo nesses últimos 7 anos.

Ao meu grande amigo-irmão Gustavo Sales, agradeço por estar presente em todos os momentos em que precisei para aconselhar e ser aconselhado.

Ao professor Luis Carlos Bonin, agradeço pela disponibilidade em debater sobre os mais diversos aspectos do trabalho.

Meus agradecimentos também para os laboratoristas do LAMTAC, em especial ao Seu Airton e ao Dr. Nei Vaske, que me auxiliaram em todas as etapas dos ensaios.

Agradeço também aos bolsistas que me ajudaram; em especial a Taíse, Emili e Anna, muito obrigado.

Aprendi através da experiência amarga a suprema lição:  
controlar minha ira e torná-la como o calor que é  
convertido em energia. Nossa ira controlada pode ser  
convertida numa força capaz de mover o mundo.

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

A alta no mercado da construção civil na última década demandou um grande volume de agregados e materiais cimentícios, estes por sua vez, são conhecidos como um dos grandes geradores de gases nocivos ao meio ambiente, desde a sua produção, até a utilização de máquinas para a extração. Visando reduzir o impacto e primando pela sustentabilidade, a indústria do concreto começou a utilizar resíduos gerados por outras indústrias não apenas em substituição ao cimento Portland, mas também aos agregados, de forma que não haja prejuízo as suas características. Entretanto, mesmo com uma quantidade relevante de estudos já realizados, a diversidade de resíduos existentes demanda novas pesquisas, pois cada tipo de resíduo se comporta de forma singular. O estado do Rio Grande do Sul se destaca no cenário nacional com a terceira maior produção de pedras preciosas do Brasil e, assim como em outros mercados, há uma geração de resíduos ocasionada pelo beneficiamento das pedras, este por sua vez deve ser remanejado de forma a reduzir os impactos causados ao meio ambiente. Estudos anteriores demonstram um comportamento satisfatório do pó de rolagem de ágata quando utilizado em substituição ao agregado miúdo de calcário em argamassas de cimento Portland branco. O presente trabalho visa analisar a influência do resíduo de pó de rolagem de ágata em concretos de cimento Portland branco. Para isso foi empregado um traço (1:5) com quatro teores diferentes de substituição do agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata (em volume), o traço de referência, sem substituição, o segundo com 15% e o terceiro e quarto com 30 e 45% respectivamente. Para avaliar as matrizes cimentícias foram realizados os ensaios para avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade para o quesito absorção por capilaridade e por imersão. Os resultados apontam uma redução de resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral nos traços com substituição, porém este decréscimo não é significativo estatisticamente, este fato pode estar relacionado com o aumento da relação a/c para manter a mesma trabalhabilidade; nos ensaios de durabilidade, foi possível observar uma melhora significativa na parte de absorção por capilaridade nos traços com substituição.

Palavras-chave: Concreto Branco. Resíduo. Pó de rolagem de ágata.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Mapa gemológico da região sul do Brasil.....	25
Figura 2 – Processo de beneficiamento dos geodos de ágata.....	27
Figura 3 – Programa experimental para o estado endurecido aos 28 dias de idade.....	30
Figura 4 – Difratoograma de raio X do agregado miúdo de calcário.....	32
Figura 5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de calcário.....	33
Figura 6 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata.....	34
Figura 7 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata passante na peneira de 150 $\mu$ m.....	36
Figura 8 – Fluxograma dos teores ensaiados e suas respectivas substituições.....	38
Figura 9 – Ensaio de abatimento de cone ( <i>slump test</i> )(a) cone após a remoção (b) medição da altura do abatimento.....	41
Figura 10 – (a) CPs sendo vibrados e (b)realocados em local adequado após moldagem	42
Figura 11 – Vista geral dos corpos de prova com superfície retificada.....	44
Figura 12 – Ensaio de tração por compressão diametral.....	45
Figura 13 – Ensaio de absorção por capilaridade.....	45
Figura 14 – Vista geral da verificação da massa do corpo de prova em balança hidrostática.....	47
Figura 15 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de pó de rolagem de ágata na resistência à compressão uniaxial aos 28 dias.....	52
Figura 16 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de pó de rolagem de ágata na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	55
Figura 17 – Médias e coeficiente de variação do MED em concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias.....	58
Figura 18 – Média dos valores de absorção por capilaridade para os diferentes teores de PRA medidos em intervalos normatizados.....	59
Figura 19 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo.....	62
Figura 20 – Análise visual do perfil de umidade (a) lado externo do CP; (b) lado interno .....	64



Figura 21 – Teste não normatizado de eficiência de corante para marcação do perfil de umidade (a) CPs em vasilhames com lâmina d'água com corante verde e rosa; (b) vista superior do CP evidenciando o perfil de umidade na parte interna; (c) vista superior do CP na parte externa.....	64
Figura 22 – Inspeção visual interna dos corpos de prova quando ensaiados com corante	65
Figura 23 – Médias e coeficiente de variação do ensaio de absorção de água por imersão total para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias.....	67
Figura 24 – Médias e coeficiente de variação dos índices de vazios para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias.....	69
Figura 25 – Médias e coeficiente de variação da massa específica para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias.....	71
Figura 26 – Médias e coeficiente de variação da velocidade de propagação ultrassônica em concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica do cimento Portland branco.....	31
Tabela 2 – Verificação de perda ao fogo do cimento branco.....	31
Tabela 3 – Caracterização Química do agregado miúdo de calcário.....	32
Tabela 4 – Caracterização física do agregado miúdo de calcário.....	33
Tabela 5 – Caracterização física do pó de rolagem de ágata.....	34
Tabela 6 – Caracterização física do pó de rolagem de ágata pelo método BET.....	35
Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.....	37
Tabela 8 – Quantidade de materiais utilizados por traço em kg.....	38
Tabela 9 – (a) Quantidade de material utilizado no teor 0%, (b) Distribuição granulométrica 0%, (c) Quantidade de material no teor 15%, (d) Distribuição granulométrica 15%, (e) Quantidade de material utilizado no teor 30%, (f) Distribuição granulométrica 30%, (g) Quantidade de material utilizado no teor 45%, (h) Distribuição granulométrica 45%.....	39
Tabela 10 – Relação água cimento dos traços e abatimento pelo slump test.....	41
Tabela 11 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias.....	51
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão uniaxial.....	51
Tabela 13 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade.....	54
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à tração por compressão diametral.....	55
Tabela 15 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias.....	56
Tabela 16 – Análise de variância do MED em programa computacional estatístico...	57
Tabela 17 – Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo ( $g/cm^2$ ) de concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo por resíduo de PRA.....	59
Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) – Absorção por capilaridade.....	60
Tabela 19 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na absorção por capilaridade, aos 28 dias.....	61
Tabela 20 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na absorção por imersão total, aos 28 dias.....	66
Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) – Absorção por imersão total.....	66

Tabela 22 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no índice de vazios, aos 28 dias.....	68
Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) – Índice de vazios.....	69
Tabela 24 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na massa específica da amostra seca, aos 28 dias.....	70
Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) – Massa específica da amostra seca.....	70
Tabela 26 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na velocidade de propagação de onda ultrassônica, aos 28 dias....	72
Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) – Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	73

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM – American Society of Testing and Materials  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
LAMTAC: Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído  
NBR – Norma Brasileira Regulamentada  
NM – Norma Mercosul  
NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação na Edificação  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de alumínio  
 $\text{CaO}$  – Óxido de cálcio  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Óxido de ferro  
 $\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de potássio  
 $\text{MgO}$  – Óxido de magnésio  
 $\text{MnO}$  – Óxido de manganês  
 $\text{P}_2\text{O}_5$  – Óxido de fósforo  
 $\text{SiO}_2$  – Dióxido de silício  
 $\text{SO}_3$  – Trióxido de enxofre  
 $\text{SrO}$  – Óxido de Estrôncio  
 $\text{TiO}_2$  – Dióxido de titânio

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C – grau Celsius

% - porcentagem

a/c – relação água/cimento

AMC – agregado miúdo de calcário

CPs – Corpos de prova

CPB – Cimento Portland Branco

g - gramas

g/cm<sup>3</sup> - gramas/centímetro cúbico

GPa – Giga Pascal

h – horas

Kg - quilogramas

m<sup>2</sup>/g – metro quadrado/grama

MED – Módulo de Elasticidade Dinâmico

MF – Módulo de finura

MPa – Mega Pascal

PRA – pó de rolagem de ágata

RCD – resíduo de construção e demolição

RCG – resíduo de corte de granito

RS – Rio Grande do Sul

T - temperatura

t/mês: tonelada/mês

UR: umidade relativa

µm – micro metro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	15
<b>2.2.2 Objetivo Secundário</b> .....	15
2.3 HIPÓTESE .....	16
2.4 DELIMITAÇÕES.....	16
2.5 LIMITAÇÕES.....	16
2.6 DELINEAMENTO.....	16
<b>3 RESÍDUOS APLICADOS EM CONCRETOS</b> .....	18
3.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	18
3.2 DESEMPENHO DO CONCRETO COM RESÍDUOS.....	21
<b>3.2.1 Desempenho mecânico</b> .....	21
<b>3.2.2 Durabilidade</b> .....	23
3.3 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO.....	24
3.4 RESÍDUOS DE ÁGATA.....	25
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	29
4.1 METODOLOGIA.....	29
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	30
<b>4.2.1 Cimento Portland Branco</b> .....	30
<b>4.2.2 Agregado miúdo</b> .....	31
<b>4.2.3 Pó de rolagem de ágata</b> .....	34
<b>4.2.4 Agregado graúdo</b> .....	36
4.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	37
4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	40
<b>4.4.1 Mistura dos materiais</b> .....	40
<b>4.4.2 Moldagem dos corpos de prova</b> .....	42
<b>4.4.3 Cura</b> .....	42
4.5 ENSAIOS REALIZADOS.....	43
<b>4.5.1 Ensaio de resistência à compressão uniaxial</b> .....	43
<b>4.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</b> .....	44
<b>4.5.3 Ensaio de absorção por capilaridade</b> .....	45

<b>4.5.4 Ensaio de determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.5 Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....</b>	<b>48</b>
<b>4.5.6 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....</b>	<b>48</b>
<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1.1 Resistência à compressão axial.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1.2 Resistência à tração por compressão diametral.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.3 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....</b>	<b>56</b>
<b>5.2 ANÁLISE DE DURABILIDADE DO CONCRETO.....</b>	<b>58</b>
<b>5.2.1 Absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>58</b>
<b>5.2.2 Absorção por imersão.....</b>	<b>65</b>
<b>5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CONCRETO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.3.1 Índice de vazios.....</b>	<b>68</b>
<b>5.3.2 Massa específica da amostra seca.....</b>	<b>70</b>
<b>5.3.3 Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....</b>	<b>72</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>





## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil nos últimos anos vem tentando se adequar a tendência mundial de sustentabilidade, diz-se que uma construção é sustentável quando utiliza materiais ou tecnologias visando o bom uso e economia de recursos finitos (ISAIA, 2005). A busca por reduzir a extração de recursos naturais tem se tornado cada dia mais importante, pois a quantidade de insumos utilizados aumenta a cada ano concomitantemente à urbanização da população mundial e à necessidade de novas edificações.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que os concretos produzidos mundialmente são compostos em média de 80% por agregados, o que corresponde à utilização de aproximadamente 27 bilhões de toneladas de agregados extraídos de jazidas e rios utilizados anualmente. Dessa forma, a indústria da construção tem buscado utilizar novos componentes na fabricação de concretos.

Uma alternativa sustentável seria a utilização de resíduos produzidos por indústrias próximas ao local das edificações; assim seria possível dar uma destinação final adequada para o resíduo, evitando sua deposição em aterros e conseqüentemente reduzindo o impacto ambiental gerado. Muitos dos materiais hoje utilizados como adição ao cimento Portland, por exemplo, eram inicialmente um problema para as indústrias, entretanto quando estudado as propriedades desses resíduos, verificou-se que não apenas melhorava o desempenho do concreto como também impactava de forma significativa nas etapas de hidratação e cura do concreto. Um desses estudos foi realizado por Costa (2015), quando este utilizou a cinza volante em substituição ao cimento em argamassas, a autora verificou que o resíduo aumentou seu índice de atividade pozolânica em 83,5% aos 63 dias de idade, o que pode acarretar em ganho de resistência em idades maiores. Estima-se que 40% do concreto produzido no mundo seja utilizado em reparos e renovação do ambiente construído (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, associar uma melhora na durabilidade à utilização de resíduos de determinada indústria acarreta em menor extração de recursos e destinação adequadamente sustentável aos resíduos anteriormente depositados em aterros torna o material mais durável.

No estado do Rio Grande do Sul, a indústria de pedras preciosas é a principal atividade de muitos municípios, sendo na parte de extração e/ou beneficiamento de gemas. Estes processos agregam valor aos materiais, todavia geram uma quantidade muito grande de resíduos, dentre eles o pó de rolagem de ágata, material de coloração branca. A reciclagem desse material foi uma alternativa inteligente e viável desenvolvida por pesquisadores do LAMTAC/NORIE - UFRGS em parceria às empresas locais, em que buscou-se substituir parte dos agregados comumente utilizados na confecção de concreto de cimento Portland branco (CPB); o calcário, por este resíduo. Um estudo anterior realizado por Petry (2015) mostrou possibilidades da utilização do resíduo em argamassas de cimento Portland Branco, entretanto para que o resíduo seja viabilizado são necessários estudos mais aprofundados, dentre estes deve-se verificar a influência na reação álcali-agregado. A escolha deste tipo específico de cimento deve-se ao fato de o pó de rolagem de ágata ser um material de coloração clara, portanto em misturas de concreto com cimento Portland branco, não impacta de forma significativa na cor final.

O presente trabalho tem o objetivo de verificar a viabilidade do uso deste resíduo agora em concretos, quanto ao seu desempenho quando utilizado em estruturas e principalmente se ocorre algum ganho significativo na durabilidade dos concretos, apresentando as características físicas e granulométricas dos materiais e do resíduo utilizado.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes do trabalho são descritas a seguir.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão da pesquisa deste trabalho é: o uso de resíduos de pó de rolagem de ágata influencia nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto sem perda de desempenho quando comparado a concretos sem resíduos.

### **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 averiguar se, assim como em argamassas, o pó de rolagem de ágata pode ser utilizado como substituição parcial do agregado miúdo de calcário em concretos de cimento Portland branco, sem que haja prejuízo as suas características físicas, mecânicas e de durabilidade.

#### **2.2.2 Objetivo Secundário**

Como objetivos secundários do trabalho buscou-se analisar a influência da substituição de diferentes teores de agregado miúdo de calcário pelo pó de rolagem de ágata:

- a) na resistência à compressão uniaxial;
- b) na resistência à tração por compressão diametral;
- c) na absorção por capilaridade;
- d) na absorção por imersão total;
- e) na determinação do índice de vazios;
- f) na determinação da massa específica;

- g) no módulo de elasticidade dinâmico.

## 2.3 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese deste trabalho que a substituição de agregado miúdo de calcário por agregado de resíduo de pó de rolagem de ágata mantém ou até mesmo melhora o desempenho do concreto de cimento Portland branco quanto às propriedades mecânicas e durabilidade.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo da influência de um resíduo gerado a partir do beneficiamento de ágata extraído na cidade de Soledade, no estado do Rio Grande do Sul.

## 2.5 LIMITAÇÕES

As limitações do trabalho são:

- a) a utilização de 1 traço (1:5) específico de concreto;
- b) os resíduos foram obtidos de uma única empresa localizada no município de Soledade/RS;
- c) o cimento Portland branco utilizado é de um único fabricante.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) execução dos experimentos;
- d) análise dos resultados;
- e) considerações finais.

Escolhido o tema da pesquisa, iniciou-se com a **pesquisa bibliográfica**, que visa formar e consolidar os conceitos teóricos para facilitar o entendimento de todas as etapas do trabalho. Nesta etapa, buscou-se informação através da consulta à trabalhos anteriormente publicados, não apenas sobre o resíduo de ágata, mas de outros tipos de resíduos que poderiam ser utilizados em substituição ao agregado miúdo de calcário. Outro fator importante foi a utilização de materiais já ensaiados anteriormente, que permitissem obter uma base comparativa do comportamento do resíduo em argamassas e concretos.

Assim concluída a parte inicial do trabalho, realizou-se a **definição do programa experimental**, cujo objetivo principal é definir o método de ensaio que possibilite uma análise completa dos resultados. Nesta fase é importante definir as variáveis a serem estudadas, obter e estimar aproximadamente as quantidades de materiais necessário para a moldagem dos corpos de prova que serão ensaiados.

Com o programa experimental definido inicia-se a **execução dos ensaios**, com a caracterização dos materiais que não haviam sido caracterizados. Realiza-se então a dosagem do traço, calculando a quantidade necessária em massa de cada um dos itens necessários para a confecção do concreto. O próximo passo consiste em separar os materiais constituintes por massa nas quantidades delimitadas e iniciar a moldagem, para isso realiza-se a imprimação da betoneira de eixo vertical com uma relação cimento/agregado miúdo de 1:3, a fim de evitar perda de material que fica aderido nas paredes ou nas espátulas. Com a moldagem realizada, cobre-se os corpos de prova evitando assim que a água da mistura evapore e interfira no processo de cura. Após 24 horas, os corpos de prova são desmoldados e colocados em câmara úmida com temperatura e umidade controlada, permanecendo em cura até atingir a idade de 28 dias.

Ao finalizar a cura começam os ensaios para a obtenção dos valores resultantes. Em posse destes inicia-se a fase final, que compreende numa detalhada **análise dos resultados**, na qual é realizado o comparativo entre os resultados obtidos, e o desempenho do concreto de cimento Portland branco. A última etapa é a de conclusão, que finaliza o trabalho e argumenta se os novos conhecimentos adquiridos foram considerados suficientes para comprovar a eficiência desse resíduo para a utilização em concretos.

### **3 RESÍDUOS APLICADOS EM CONCRETO**

Neste trabalho serão abordadas as definições e classificações, aspectos normativos e gerais, sustentabilidade, pesquisas anteriores, entre outros assuntos relacionados ao resíduo gerado pelo beneficiamento de ágata durante a etapa de rolagem, quando aplicados em substituição ao agregado miúdo na confecção de concretos de cimento Portland branco, assim como os dados gerados através dos ensaios realizados e descritos posteriormente.

A utilização de resíduos na construção civil já é considerada uma tendência mundial, muitos estudos foram elaborados e tantos outros estão em andamento, buscando novas alternativas de materiais que não só mantenha as características principais do concreto, mas também que melhore alguns de seus aspectos, como resistência e durabilidade.

#### **3.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Com o crescimento acentuado da indústria da construção civil na última década, ao mesmo tempo em que muitos empreendimentos foram criados, a quantidade de insumos utilizados para a realização de tais empreendimentos aumentou consideravelmente. Um dos principais componentes da fabricação de concreto é o agregado miúdo. Visando a redução de extração desse material da natureza algumas alternativas começaram a ser estudadas, com o objetivo de reduzir o consumo e não prejudicar o desempenho estrutural e estético das estruturas de concreto.

Entretanto, sabe-se que a extração de matéria prima não é o único problema quando se observa do ponto de vista sustentável, nessa procura por materiais alternativos encontra-se os resíduos oriundos dos mais diferentes ramos, John e Agopyan (2000) afirmam que o emprego de resíduos em construção é praticado desde a antiguidade, e foi muito utilizado na reconstrução da Europa pós-guerra, especialmente na Holanda. Dentre os resíduos já estudados, existem os que são provenientes da indústria do beneficiamento de pedras preciosas. O estado do Rio Grande do Sul ocupava o terceiro lugar no país quanto à produção destas pedras até a década passada, apenas atrás de Minas Gerais e Bahia (BRANCO;

VIERO, 2004). No caso da ágata, desde a extração da pedra bruta até o produto final são necessários diversos processos de tratamento, uma das etapas é a rolagem do material que faz com que a rocha tenha suas arestas aparadas e atinja um formato mais esférico, a sobra desse processo é um resíduo denominado pó de rolagem de ágata que, até pouco tempo atrás, era descartado.

Inicialmente se faz necessário compreender como esses resíduos são classificados. A NBR 10.004/04 introduz uma breve classificação:

- a) classe I (perigosos): estes resíduos são os caracterizados como inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos. Sendo assim, são os que apresentam algum tipo de risco ao meio ambiente e/ou indivíduo;
- b) classe II (não perigosos): estes resíduos estão subdivididos em duas subclasses,
  - classe II A (não inertes): não são configurados nas categoria de resíduos classe I (perigosos) ou na de resíduos classe II B (inertes). Estes resíduos podem ser biodegradáveis, combustíveis ou serem solúveis em água;
  - classe II B (inertes): são os resíduos que não sofrem solubilização ao ponto de alterar as características da água, quando são expostos à ela., sendo a água (destilada ou deionizada) em temperatura ambiente.

Um estudo realizado por Pereira (2011) verificou que o resíduo oriundo do beneficiamento de ágata é considerado inerte, sendo classificado na classe IIB. No entanto a deposição desse material em aterros sanitários, por exemplo, pode acabar gerando certo impacto ambiental. Conforme a Resolução Nº 1 Art. 1º do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986), considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias

do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais.

A lei de número 12.305, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos define entre seus objetivos a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Em vista disso compreende-se que, dar um fim adequado a qualquer tipo de resíduo é, não apenas um dever sustentável, mas também um dever legal. Pinto (1999) salienta que quando não há uma política para a deposição de resíduos da construção civil em cidades, os pequenos coletores buscam áreas livres nas proximidades para a deposição do material. Consequentemente esses locais acabam por receber materiais de descartes de todos os tipos para o qual não se tenha solução de captação rotineira, impedindo que o resíduo de construção seja reaproveitado devido à contaminação. Jacobi e Besen (2011) complementam que as deposições irregulares de resíduos sólidos causam impactos socioambientais, como por exemplo: degradação do solo, contaminação de mananciais, intensificam enchentes e contribuem para a poluição do ar e proliferação de vetores de doenças.

Agregar valor aos resíduos das indústrias acabam por aumentar o interesse do responsável em no produto, esse interesse aumenta se for possível comercializar o resíduo, um exemplo disso é a cinza volante, subproduto da indústria termelétrica que após algumas pesquisas descobriu-se uma intensa atividade pozolânica quando usado na produção de concreto. Após essa descoberta algo que antes era um problema a ser solucionado acabou se tornando uma nova forma de gerar ativos para as usinas, tornando-a um coproduto da queima do carvão.

Partindo desse princípio novos estudos tentam de forma árdua descobrir novos materiais que antes descartados, passam a impactar positivamente na indústria da construção civil, tanto mantendo as propriedades do concreto e argamassa como também melhorando o desempenho dessas estruturas, principalmente através do aumento de resistência mecânica e/ou melhorando sua durabilidade.

Petry (2015) salienta que a utilização de resíduos, tanto da construção civil como de indústrias dos mais variados ramos, é indicada não apenas por reduzir o consumo energético ligado à produção de materiais, mas também para diminuir os custos de destinação final, transporte e diminuir a extração de recursos naturais.



Apesar da afirmação comercial de alguns produtos, nem todos os resíduos foram devidamente testados, ainda existem muitas incógnitas à serem estudadas pelos pesquisadores, sobre seus efeitos em curto, médio e longo prazo, para que só então o material possa ser incorporado ao mercado. Estes problemas são citados por John e Agopyan (2000), onde afirmam que existem diversas barreiras a serem vencidas para a utilização de novos produtos contendo resíduos, dentre as quais o aperfeiçoamento das tecnologias e divulgação das pesquisas sobre este tema. Os autores ainda relatam que o desenvolvimento do controle de qualidade dos produtos é muito importante e para isso se faz necessário pesquisá-los. Petry (2015) complementa que a falta de conhecimento sobre os resíduos explica o receio dos técnicos para a utilização dos materiais, fato que muito ocorre no Brasil. É importante salientar que os resíduos utilizados nos concretos, normalmente são gerados em locais próximos ao local de onde serão utilizados, pois o valor destinado ao transporte desse material é levado em conta na hora de optar, ou não, pela sua utilização.

## 3.2 DESEMPENHO DO CONCRETO COM RESÍDUOS

A fim de transmitir confiança aos técnicos acerca da utilização de resíduos no concreto, há de se verificar se o emprego de tais materiais não gera prejuízo as suas características. Muitos deles já foram testados e apresentaram resultados muito satisfatórios, como por exemplo a escória de aciaria elétrica, outro resíduo da indústria de siderurgia, testada por Masuero et al. (2000) e o resíduo de corte de granito pesquisada por Gonçalves (2000). Recentemente, resíduos de construção e demolição (RCD) tem sido amplamente estudados, visto que o acesso a este tipo de material é muito mais comum podendo ser empregado nos mais diferentes tipos de concreto. Porém alguns resíduos podem apresentar desempenho inferior ao concreto convencional. Cordeiro (2013) testou diferentes tipos de agregado graúdo reciclado de concreto e verificou um aumento de porosidade desses concretos.

### 3.2.1 Desempenho mecânico

Para avaliar as matrizes cimentícias no que tange o desempenho mecânicos, dentre os testes mais importantes tem-se os ensaios de resistência à tração e compressão. Vieira Filho (2007) afirma que para ensaios de resistência mecânica, o principal parâmetro (ou o mais objetivo) a

ser observado é o ensaio de resistência à compressão, onde os corpos de prova são submetidos a uma carga axial e os valores obtidos no ensaio retratam a resistência potencial a ser atingida quando este concreto for empregado em outras estruturas. Outros ensaios, tais como a resistência à tração por compressão diametral também são comumente utilizados, o concreto é um material muito resistente quando ensaiados a compressão, todavia o mesmo não ocorre quando é tracionado, os valores de resistência à tração permanecem sempre próximos à 10% do valor gerado pela resistência à compressão.

Algumas características dos resíduos podem afetar diretamente na resistência à compressão do concreto, por exemplo materiais porosos como o RCD, quando utilizados em substituição ao agregado graúdo acabam absorvendo uma quantidade maior de água da mistura, o que impacta diretamente na trabalhabilidade, Carrijo (2005) confirma que a porosidade de um RCD é a característica mais importante a ser estudada quando se emprega esses materiais em concreto, mais ainda do que a constituição mineral deste resíduo, desta forma é possível também afirmar que: a resistência à compressão dos concreto é muito influenciada pela porosidade dos materiais que o compõe e pela porosidade da zona de transição. Quando se utiliza agregado reciclado nas misturas de concreto, a relação a/c e o teor de agregado graúdo reciclado são os fatores de maior influência na determinação da resistência, ou seja, a porosidade da matriz, determinada pela relação a/c, e a porosidade do agregado são fatores de fundamental importância na resistência final dos concretos (LEITE, 2001).

Outro tipo de resíduo que já teve seu desempenho mecânico testado foi o resíduo de corte granítico, mas dessa vez em substituição ao cimento. Gonçalves (2000) testou este resíduo quanto a resistência à compressão axial e tração por compressão diametral: para o primeiro ensaio todos os traços que utilizaram resíduo apresentaram melhora de desempenho, com o ganho de resistência chegando a 19,6% para concretos com 20% do resíduo; já para a tração o traço com 10% de RCG apresentou melhoras e o traço com 20% reduziu a resistência quando comparado ao concreto de referência, entretanto essa diferença não é significativa segundo o autor.

### 3.2.2 Durabilidade

Outro aspecto de grande importância no estudo de concretos com utilização de resíduo é a sua durabilidade. Mehta e Monteiro (2014) ressaltam a importância da verificação de durabilidade dos concretos, primeiro devido às implicações socioeconômicas da durabilidade; pois o custo de reparo e substituição das estruturas por falhas nos materiais é de suma importância no orçamento total da construção. Os autores ainda enfatizam que existe uma relação muito próxima entre a durabilidade dos materiais e a ecologia, de modo que ao empregar materiais mais duráveis na construção, evita-se a utilização de novos recursos naturais, sendo assim uma atitude ecológica.

Estruturas de concreto possuem uma vida útil elevada de 50 a 100 anos, mas para isso é necessário evitar o aparecimento de manifestações patológicas ou dos agentes responsáveis pela degradação deste elemento. Penetração de cloretos, ataque de sulfatos e carbonatação podem ser evitados se o concreto for pouco permeável, a falta dessa característica pode facilitar o desenvolvimento das manifestações patológicas e acarretar transtornos aos usuários, tais com problemas de saúde, efeitos estéticos indesejáveis e até mesmo o comprometimento da estrutura. Sendo assim, existem diversas formas de medir o quanto um concreto pode absorver de água. Dentre essas existem ensaios de absorção por capilaridade, onde se coloca um corpo de prova sobre lamina d'água, observando seu fluxo ascensional. Ensaio por imersão total, onde os corpos de prova permanecem submersos e até mesmo um ensaio mais moderno; o qual se faz necessário a utilização de equipamento de ultrassom, que mede a velocidade necessária de uma onda ultrassônica para atravessar um corpo de prova. Quanto maior a quantidade de vazios internos, mais dificuldade a onda terá de percorrer o caminho e conseqüentemente menor será a velocidade de propagação.

O estudo realizado por Petry (2015) com o mesmo tipo de resíduo, apresentou resultados satisfatórios quando testados em argamassas para concreto de cimento Portland branco, onde aconteceu uma redução considerável na taxa de absorção de água por capilaridade para o traço 1:4,5 com 15, 30 e 45% de substituição de agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata. A utilização do PRA na mesma pesquisa verificou

### 3.3 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO

O concreto de cimento Portland branco é muito utilizado por arquitetos ao redor do mundo devido às suas características estéticas. A fabricação de cimento branco data do fim do século XIX e alcançou seu apogeu na Alemanha pós guerra, onde muitas obras foram realizadas com a utilização deste tipo de cimento (KEIL; GONZALES, 1973). Hoje em dia, a Espanha se sobressai no cenário mundial como o lugar com mais edificações utilizando o concreto branco, muito disso devido à atuação do famoso engenheiro e arquiteto nascido em Valência chamado Santiago Calatrava, que projetou grandes obras em diversos países utilizando esse tipo de concreto. No Brasil, a utilização de concreto cromático iniciou no ramo das peças pré-fabricadas, principalmente através dos pavimentos intertravados de concreto colorido, visto que o emprego do cimento branco, nesse caso, permite maior fidelidade à cor. Na cidade de Porto Alegre há o Museu Iberê Camargo, também produzido com concreto de cimento branco e projetado pelo arquiteto Álvaro Siza Vieira, construído com o auxílio de professores do NORIE, o laboratório de edificações da UFRGS, no desenvolvimento do concreto.

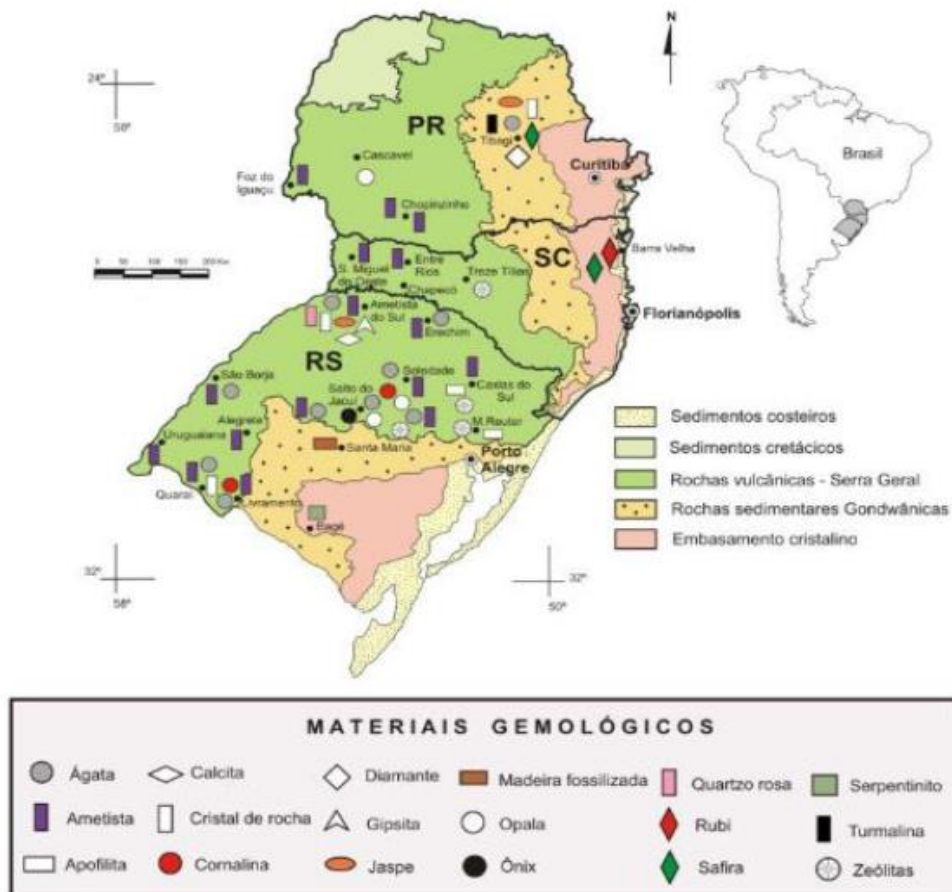
As vantagens da utilização de concreto de cimento Portland branco são principalmente; a satisfação estética, por esse motivo costuma ser muito utilizado em lugares de grande visitação turística, como museus, igrejas e monumentos; a eliminação da utilização de tintas e outros tipos de revestimento, pois quando bem executada a concretagem, o concreto não fica poroso e, portanto, sujeito a ações de carbonatação e outras patologias; e facilidade de pigmentação para a obtenção de cores vivas. Em contraponto se tem a alta capacidade de manchamento deste concreto, por esse motivo deve-se ter um cuidado especial durante todo o processo de construção; desde a dosagem, onde seleciona-se os tipos de agregado e adições, até a utilização de andaimes quando utilizados em contato com a edificação, que caso enferrujados também podem alterar a coloração do concreto.

De acordo com artigo publicado na Global Cement Magoazine (2015), o maior produtor de cimento branco no mundo, no ano de 2014 foi o Egito, com uma produção de mais 2,69 milhões de toneladas por ano; seguido pela Espanha e Turquia. O mesmo artigo afirma que existe uma alta demanda de cimento branco em países de climas quentes, pois as superfícies de edificações produzidas com concreto de cimento branco refletem os raios solares, mantendo uma temperatura mais agradável no interior das construções.

### 3.4 RESÍDUOS DE ÁGATA

A extração de pedras preciosas é um mercado muito forte no estado do Rio Grande do Sul, Branco e Gil (2002) afirmam que o estado é um dos maiores exportadores brasileiro de gemas lapidadas, isso remete à formação geológica da região, onde aconteceram muitos derrames devido a atividades vulcânicas– como consequência do processo a deposição desse magma explica a grande incidência de rochas ígneas na parte sul do Brasil, como demonstra a Figura 1.

Figura 1– Mapa gemológico da região sul do Brasil



(fonte: Juchem et al. 2001)

Ao mesmo tempo em que camadas de lava vulcânica foram sendo espalhadas umas sobre as outras, ocorreu à formação de bolsões de ar que foram submetidos a condições de alta temperatura e pressão, ambiente propício para a formação de cristais de quartzo (HEMMANN, 1997). A ágata pertence a este grupo, constituída basicamente de dióxido de silício este mineral possui grande valor agregado. Após passar por um processo de beneficiamento, a ágata pode ser transformada em jóias e até mesmo esculturas, muito valorizadas no continente asiático e na Europa.

Diversos municípios gaúchos possuem atividade de mineração para a extração de ágata, uma de suas variações é a ágata umbu de coloração azul escura e de característica porosa, sendo considerada ideal para o tingimento, Branco e Gil (2002) afirmam que a incidência deste tipo de ágata no Rio Grande do Sul é de 71% dos jazimentos cadastrados. Assim como verificado na Figura 2, o tingimento e o polimento são partes do processo de beneficiamento e agregam valor comercial e beleza ao mineral, entretanto como consequência desse mesmo processo, tem-se a geração de resíduos. Durante o processo de rolagem, onde as pedras recebem tratamento superficial para que tenham suas arestas aparada e adquiram formato arredondado, resulta a formação de um pó com baixo módulo de finura e de coloração esbranquiçada. Estudos recentes, como o de Petry (2016), afirmam que este pó pode ser utilizado na composição de argamassas sem que haja prejuízo as características, visando reduzir o impacto ambiental e agregando valor a este resíduo.

Figura 2 – Processo de beneficiamento dos geodos de ágata



(fonte: PETRY, 2015)

## 4.2 USO DE RESÍDUO DE ÁGATA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A escolha do tipo de resíduo estudado se dá pela proximidade das indústrias geradoras com os centros de pesquisa, pois o custo de transporte do resíduo pode acabar por inviabilizar sua utilização. Outro fator interessante é a quantidade de resíduo gerada, informações obtidas do Arranjo Produtivo Local de pedras, gemas e jóias (2004, apud PETRY, 2015, p.26) afirmam que a quantidade de resíduo gerada pelas cinco indústrias, que utilizam o beneficiamento de ágata por rolagem na região de Soledade-RS é de aproximadamente 30 toneladas por mês quando somadas e ainda há uma reserva de 250 toneladas no município. Esses valores podem parecer altos, contudo não são absolutamente nada quando comparado aos 27 bilhões de toneladas de agregados utilizados na construção civil todos os anos (MEHTA; MONTEIRO, 2014), portanto esses resíduos seriam apenas suficientes para abastecer algumas obras na região das indústrias.

Devido à baixa quantidade do resíduo os pesquisadores optaram por utilizar em algum tipo diferente de edificação; a coloração mais clara do material oriundo do processo de beneficiamento de ágata por rolagem, propicia que este seja utilizado em substituição ao concreto de cimento Portland branco, pois até certo ponto, não altera sua principal característica; a coloração branca. Os grandes responsáveis pelo aspecto final do concreto são os finos presentes na mistura, a utilização de um cimento branco somado a utilização de areia quartzosa acaba por deixar a mistura mais amarelada. (PASSUELO, 2004).

A utilização do pó de rolagem de ágata em concretos demanda cuidados na hora da moldagem. Por ser um material muito fino, se faz necessário uma utilização maior de água na mistura para que atinja uma trabalhabilidade, quando comparado a concretos com cimentos convencionais. Contudo, aumentar a quantidade de água acarreta em perda de resistência mecânica.



## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

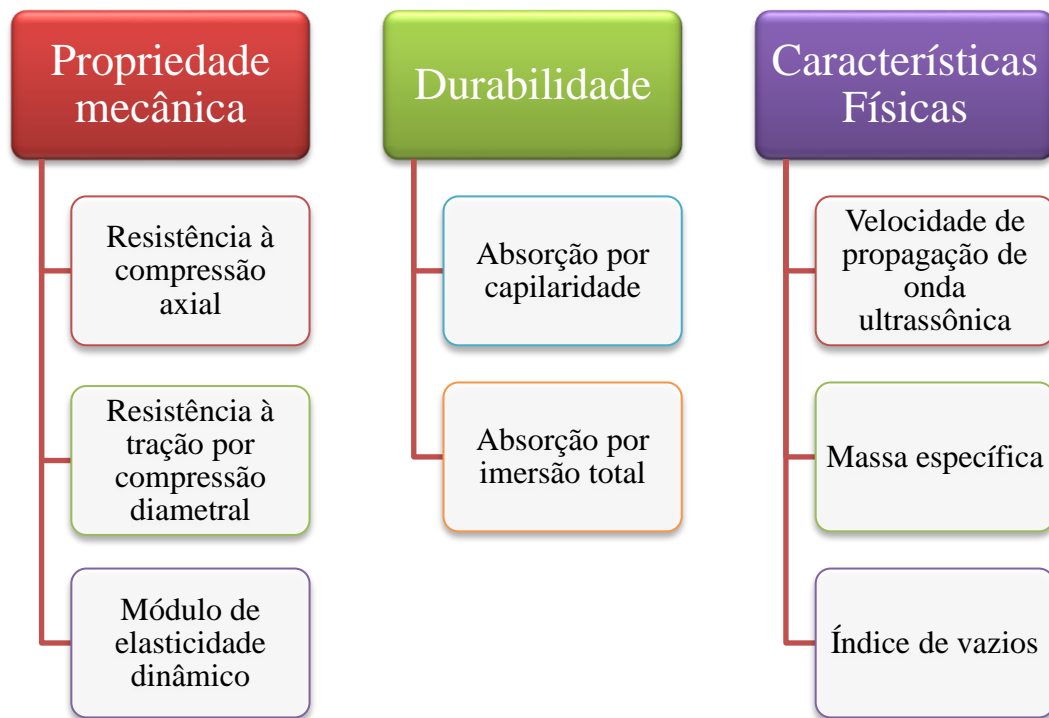
Foi desenvolvido um programa experimental visando realizar uma análise das características de propriedades mecânicas e de durabilidade, da influência do pó de rolagem de ágata na produção de concreto produzidos com cimento Portland branco, utilizou-se como parâmetro a análise do abatimento através do ensaio de slump no estado fresco. E no estado endurecido foi avaliado a resistência do material quanto à compressão e tração por compressão diametral, absorção total e absorção por capilaridade, análise de vazios por uso de ultrassom e cálculo do módulo dinâmico, para diferentes traços de concreto. Neste capítulo serão abordados os materiais utilizados nos experimentos, a dosagem definida, o processo de produção e cura do concreto e os ensaios realizados.

### 4.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa visa verificar o comportamento dos concretos de cimento Portland branco, quando empregado o resíduo de pó de rolagem de ágata em substituição ao agregado miúdo de calcário (em volume), onde escolheu-se o traço de 1:5 (cimento:agregados), com o emprego de quatro teores de substituição (0, 15, 30, 45%). Para que pudesse ser realizada uma análise comparativa entre os traços, foi fixado o abatimento do concreto em  $100 \pm 20$  milímetros e verificado pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) com o concreto no estado fresco. Este valor de abatimento baixo foi escolhido pois o cimento branco apresenta queda da trabalhabilidade em tempos mais curtos que os cimentos convencionais. Os ensaios realizados no estado endurecido estão mostrados esquematicamente na figura 3.

Este trabalho utilizou o mesmo resíduo estudado por Petry (2015). Os materiais foram utilizados na referida pesquisa de forma a não ter alteração de suas características. Da mesma forma que a caracterização dos materiais e alguns dos critérios adotados baseou-se neste trabalho.

Figura 3 – Programa experimental para o estado endurecido aos 28 dias de idade



(fonte: própria do autor)

## 4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item, serão apresentados os materiais utilizados para a produção dos concretos.

### 4.2.1 Cimento Portland Branco

Utilizou-se o **Cimento Portland Branco Estrutural**, fornecido por uma empresa da região metropolitana de Porto Alegre. A classe de resistência informado pelo fabricante é de 40MPa na idade de 28 dias. Determinou-se a massa específica do cimento conforme preconiza a NBR

NM 23:2001 (ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN) onde obteve-se o resultado da Tabela1.

Tabela 1 – Massa específica do cimento Portland branco

Cimento Portland Branco		Norma
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,91	NBR NM 23:2001

(fonte: equipe IBRACON/NORIE 2017)

Para verificar se o cimento não sofreu alteração de suas propriedades, foi realizado o ensaio de perda ao fogo (NBR NM 18:2012) resultados obtidos estão na tabela 2.

Tabela 2 – Verificação de perda ao fogo do cimento branco

	Peso Cadinho (g)	Quantidade de material	Massa medida 1	Massa medida 2	Variação (%)	Limites na NBR 12989:1994
Amostra 1	67,799	1,038	68,837	68,810	2,56	≤12
Amostra 2	58,223	1,008	59,232	59,207	2,46	

(fonte: própria do autor)

#### 4.2.2 Agregado miúdo

Utilizou-se o **agregado miúdo** de calcário, isso deve-se ao fato de que os finos utilizados na composição de concreto branco influenciam significativamente na coloração final (PASSUELO et al., 2004), sendo portanto necessário utilizar um agregado de coloração semelhante ao CPB. Por esse motivo, quando na utilização deste tipo de agregado, há de se ter muito cuidado ao armazená-lo, para que não ocorra nenhum tipo de contaminação, como sujeiras ou areia por exemplo.

A caracterização química do agregado miúdo de calcário foi realizada por Petry (2015) e está apresentado na tabela 3.

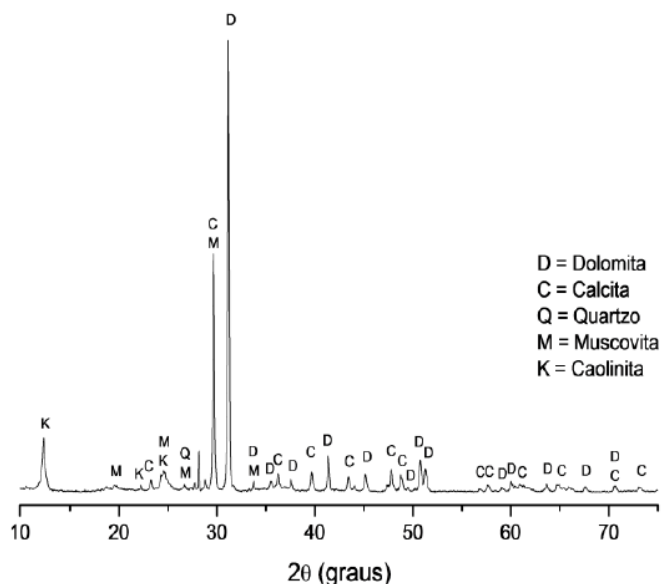
Tabela 3 – Caracterização Química do agregado miúdo de calcário

Composto	Porcentagem (%)
CaO	30,66
SiO <sub>2</sub>	20,17
MgO	9,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,81
K <sub>2</sub> O	0,31
SO <sub>3</sub>	0,26
MnO	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,15
P <sub>2</sub> O	0,05
SrO	0,05
CO <sub>2</sub>	35,36

(fonte: Petry, 2015)

Petry (2015), verificou a composição mineralógica do agregado miúdo de calcário, a partir de uma análise por difratograma de raioX, realizada no LACER/UFRS, que apresentou picos de Dolomita, Calcita, Muscovita, Quartzo e Caolinita (FIGURA 4).

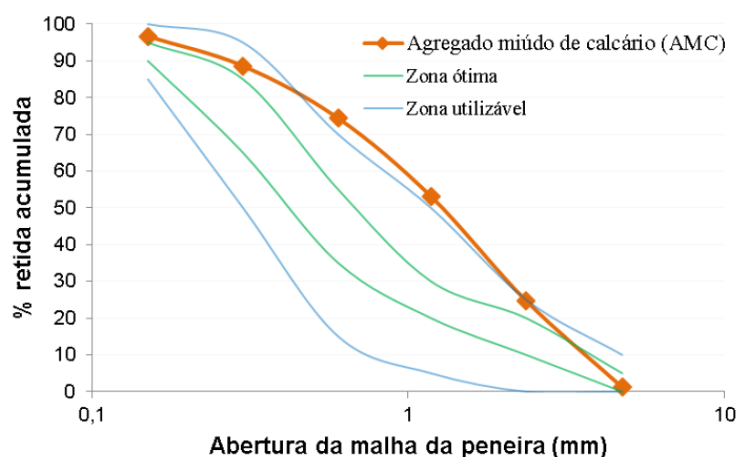
Figura 4 – Difratograma de raio X do agregado miúdo de calcário



(fonte: Petry, 2015)

Na figura 5 e na tabela 4, tem-se a distribuição granulométrica do agregado miúdo de calcário e suas características físicas.

Figura 5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de calcário



(fonte: Petry, 2015)

Tabela 4 – Caracterização física do agregado miúdo de calcário

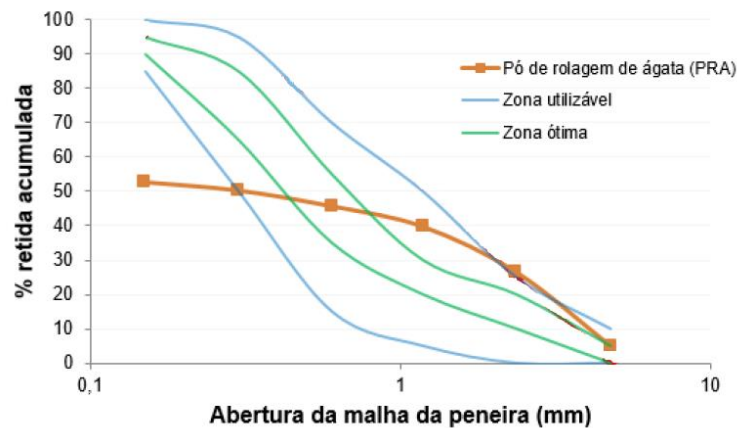
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	24	25	0	10	20	25
1,18	28	53	5	20	30	50
0,6	21	74	15	35	55	70
0,3	14	89	50	65	85	95
0,15	8	97	85	90	95	100
Fundo	3	100	-	-	-	-
<b>Módulo de Finura</b>		3,39	NBR NM 248:2003			
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>		4,75				
<b>Massa Específica(g/cm³)</b>		2,73	NBR NM 52:2009			
<b>Absorção de Água (%)</b>		1,81	NBR NM 30:2001			
<b>Massa Unitária (g/cm³)</b>		1,25	NBR NM 45:2006			

(fonte: Petry, 2015)

### 4.2.3 Pó de rolagem de ágata

O pó de rolagem de ágata foi coletado diretamente da empresa de beneficiamento de ágata. Este material foi utilizado em substituição parcial ao agregado miúdo de calcário (em volume), comumente utilizado na composição de concreto branco. Para isso, o resíduo foi armazenado em bombonas e posteriormente caracterizado da mesma forma que o agregado miúdo de calcário. A Figura 6 apresenta a distribuição granulométrica do pó de ágata, percebe-se uma grande quantidade de material passante na peneira de 150  $\mu\text{m}$ . A porcentagem de passante esta apresentado na tabela 5.

Figura 6 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata



(fonte: Petry, 2015)

Tabela 5 – Caracterização física do pó de rolagem de ágata

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	5	5	0	0	5	10
2,36	22	27	0	10	20	25
1,18	13	40	5	20	30	50
0,6	6	46	15	35	55	70
0,3	5	51	50	65	85	95
0,15	2	53	85	90	95	100
Fundo	47	100	-	-	-	-
<b>Módulo de Finura</b>	2,20		NBR NM 248:2003			
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>	4,75					
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,53		NBR NM 52:2009			
<b>Absorção de Água (%)</b>	0,76		NBR NM 30:2001			
<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,54		NBR NM 45:2006			

(fonte: Petry, 2015)

A tabela 6 apresenta a caracterização física desse material passante na peneira 150 $\mu$ m do pó de rolagem de ágata. Por ser considerado um material muito fino, optou-se por um ensaio de granulometria a laser e determinação da área superficial pelo método de BET (*Brunauer, Emmett, Teller*), determinado no equipamento Nova Station A, no Laboratório do LACER/UFRGS.

Tabela 6 – Caracterização física do pó de rolagem de ágata pelo método BET

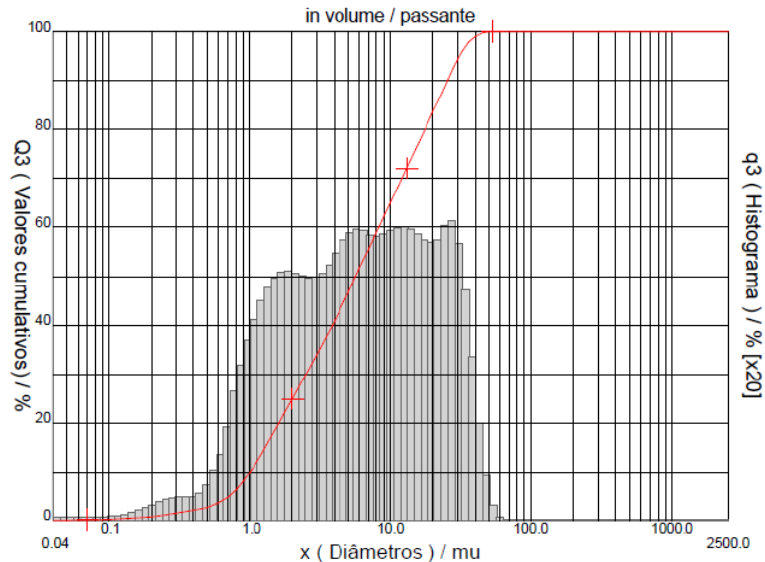
<b>Diâmetro da malha da peneira passante 10% (<math>\mu</math>m)</b>	1
<b>Diâmetro da malha da peneira passante 50% (<math>\mu</math>m)</b>	5,67
<b>Diâmetro da malha da peneira passante 90% (<math>\mu</math>m)</b>	25,57
<b>Diâmetro médio (<math>\mu</math>m)</b>	9,72
<b>Área superficial BET (m<sup>2</sup>/g)</b>	5,45

(fonte: Petry, 2015)

Conforme os dados apresentados na tabela 6, percebe-se que o diâmetro médio do PRA de 9,72  $\mu$ m é menor que o do cimento Portland branco, que possui um diâmetro médio de 14,75

$\mu\text{m}$ , sendo assim atuante como fíler na mistura de concreto. Na figura 7 observa-se a distribuição granulométrica do material passante na peneira 150 $\mu\text{m}$ .

Figura 7 – Distribuição granulométrica do pó de rolagem de ágata passante na peneira de 150 $\mu\text{m}$



(fonte: Petry, 2015)

#### 4.2.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita basáltica oriunda de jazidas da região metropolitana de Porto Alegre. A cor do agregado graúdo não interfere na coloração final do concreto branco desde que o material esteja limpo e desprovido de impurezas (FONSECA; NUNES, 1995) e não segregue da argamassa durante o processo de concretagem e cura. Isto ocorre devido ao fato dos finos migrarem para a superfície das fôrmas, sendo assim os principais responsáveis pela cromaticidade do produto final (PASSUELO; SILVA, 2004). As britas foram devidamente lavadas, secas, armazenadas no laboratório do LAMTAC e foram utilizadas em outras pesquisas. A tabela 7 mostra as características físicas do agregado graúdo obtidas por Masuero (2017).



Tabela 7–Caracterização física do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA	
	% Retido	% Retido Acumulada
19	11	11
9,5	11	99
4,8	0	100
2,4	0	100
1,2	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
<b>Módulo de Finura</b>		7,10
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>		19
<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>		1,594

(fonte: Masuero, 2017)

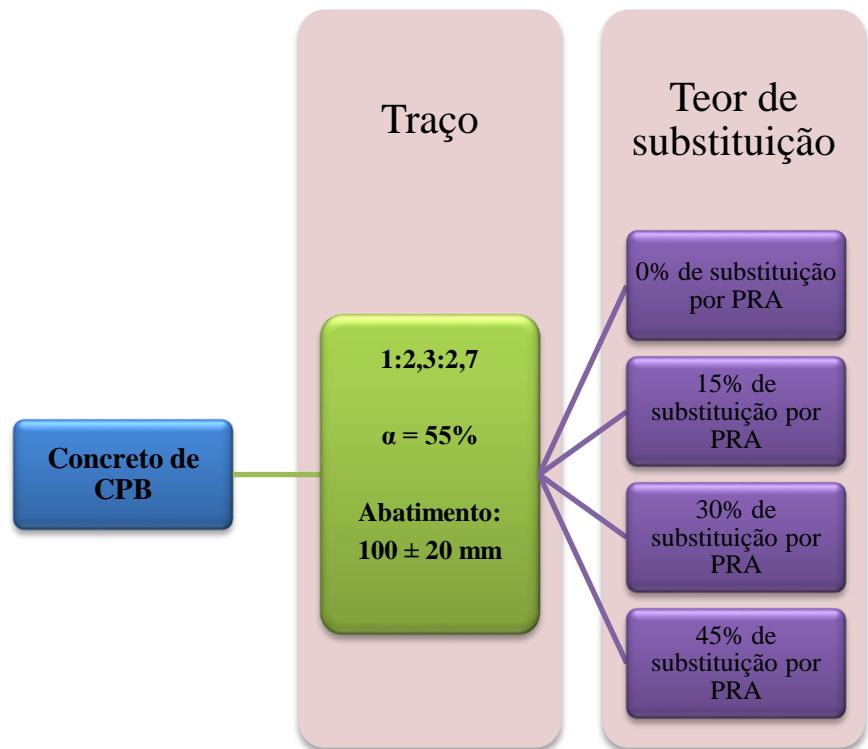
É possível observar que parte predominante do agregado graúdo utilizado ficou retido na peneira 9,5mm, ao passo que o tamanho mínimo observado foi de 6,5mm. O módulo de finura ficou em 7,1 e a massa unitária de 1,594 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Após a etapa de caracterização dos materiais envolvidos, foram iniciados os cálculos para a definição da quantidade de material à ser utilizado para cada traço. Como esta pesquisa é uma continuidade aos trabalhos anteriormente realizados por Petry (2015), adotou-se a utilização de um único traço, com relação 1:2,3:2,7 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo) em massa e 4 teores de substituição do agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata (em volume), 0% referência, 15%, 30% e 45%

O teor de argamassa ( $\alpha$ ), obtido através da dosagem do concreto pelo método do IPT/EPUSP, foi de 55%.A Figura 8 apresenta esquematicamente as misturas utilizadas.

Figura 8 – Fluxograma dos teores ensaiados e suas respectivas substituições



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 8 apresenta as quantidades de cada material separado para a pesquisa.

Tabela 8 – Quantidade de materiais utilizados por traço em kg

TRAÇO	Substituição (%)	Cimento	Agregado graúdo	Agregado miúdo de calcário	PRA	Total
1:5	0	11,11	30	25,56	0,00	25,56
	15	11,11	30	21,72	3,54	25,26
	30	11,11	30	17,89	7,08	24,97
	45	11,11	30	14,06	10,62	24,67

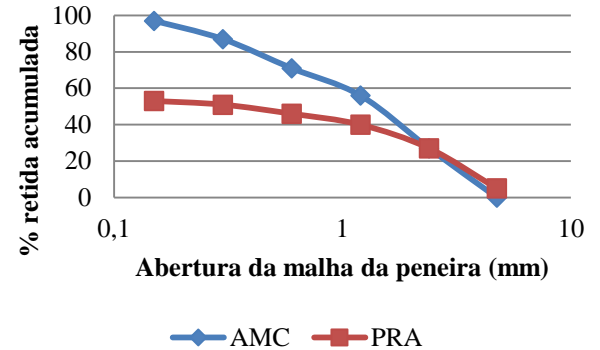
(fonte: elaborado pelo autor)

A Tabela 9 mostra os quantitativos do agregado miúdo de calcário (AMC) e do pó de rolagem de ágata (PRA) utilizado em cada teor de substituição. O módulo de finura para todos os teores é de 3,38.

Tabela 9 – (a) Quantidade de material utilizado no teor 0%, (b) Distribuição granulométrica 0%, (c) Quantidade de material utilizado no teor 15%, (d) Distribuição granulométrica 15%, (e) Quantidade de material utilizado no teor 30%, (f) Distribuição granulométrica 30%, (g) Quantidade de material utilizado no teor 45%, (h) Distribuição granulométrica 45%

0%							
Peneira	Qtd. AMC (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Qtd. PRA (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Mat. Totais (kg)
4,75	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
2,4	6,812	27	27	0,00	27	27	6,81
1,2	7,595	30	56	0,00	30	56	7,60
0,6	3,778	15	71	0,00	15	71	3,78
0,3	4,079	16	87	0,00	16	87	4,08
0,15	2,439	10	97	0,00	10	97	2,44
0	0,851	3	100	0,00	3	100	0,85
<b>TOTAL</b>							<b>25,55</b>

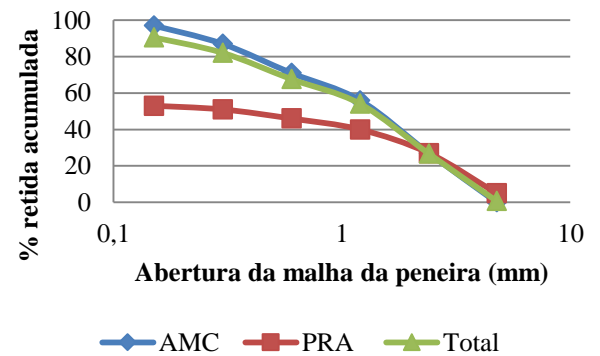
(a)



(b)

15%							
Peneira	Qtd. AMC (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Qtd. PRA (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Mat. Totais (kg)
4,75	0,00	0	0	0,18	5	5	0,18
2,4	5,79	27	27	0,78	22	27	6,57
1,2	6,46	30	56	0,46	13	40	6,92
0,6	3,21	15	71	0,21	6	46	3,42
0,3	3,47	16	87	0,18	5	51	3,64
0,15	2,07	10	97	0,07	2	53	2,14
0	0,72	3	100	1,66	47	100	2,39
<b>TOTAL</b>							<b>25,26</b>

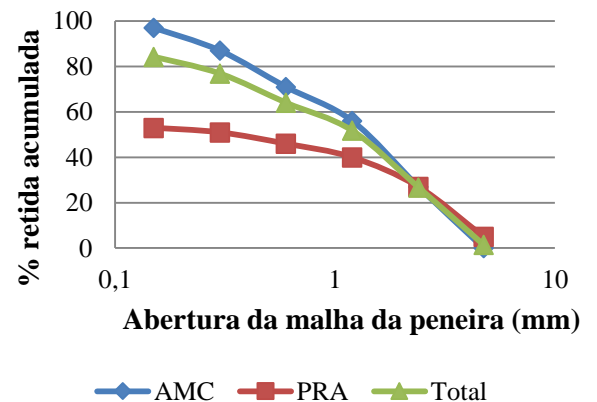
(c)



(d)

30%							
Peneira	Qtd. AMC (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Qtd. PRA (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Mat. Totais (kg)
4,75	0,00	0	0	0,35	5	5	0,35
2,4	4,77	27	27	1,56	22	27	6,32
1,2	5,32	30	56	0,92	13	40	6,24
0,6	2,65	15	71	0,42	6	46	3,07
0,3	2,86	16	87	0,35	5	51	3,21
0,15	1,71	10	97	0,14	2	53	1,85
0	0,60	3	100	3,33	47	100	3,92
<b>TOTAL</b>							<b>24,97</b>

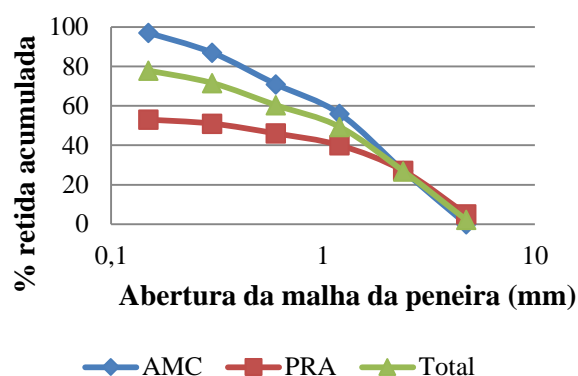
(e)



(f)

45%							
Peneira	Qtd. AMC (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Qtd. PRA (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Mat. Totais (kg)
4,75	0,00	0	0	0,53	5	5	0,53
2,4	3,75	27	27	2,34	22	27	6,08
1,2	4,18	30	56	1,38	13	40	5,56
0,6	2,08	15	71	0,64	6	46	2,71
0,3	2,24	16	87	0,53	5	51	2,77
0,15	1,34	10	97	0,21	2	53	1,55
0	0,47	3	100	4,99	47	100	5,46
TOTAL							24,67

(g)



(h)

(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Nos itens a seguir serão apresentados o processo de mistura dos componentes do concreto, ensaios em estado fresco, moldagem, bem como todo o processo de cura os quais os corpos de prova foram submetidos.

Todas as etapas do programa experimental descritos a seguir foram realizadas no LAMTAC/NORIE - UFRGS.

### 4.4.1 Mistura dos Materiais

O concreto foi produzido em betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com um traço de 1:3 (cimento branco:agregado miúdo de calcário). Este procedimento é necessário para que a argamassa da mistura não fique nem nas paredes da betoneira, nem nas pás. A ordem de colocação de material na betoneira foi: brita, água (apenas pouca quantidade para umedecer o agregado graúdo), cimento, agregado miúdo de calcário – sendo colocados frações de água durante o despejo desse material. Nos traços com substituição do agregado miúdo de calcário pelo pó de rolagem de ágata, o mesmo foi adicionado após o agregado miúdo. O tempo de mistura dos quatro diferentes concretos foram cronometrados e mantido fixo o tempo total.

Após a mistura, efetuou-se o ensaio do abatimento de tronco de cone (*slump test*). O abatimento fixado foi de  $100 \pm 20$  mm. Fixado o abatimento dos concretos, obteve-se uma pequena variação na quantidade de água para cada teor de substituição, decorrente da

quantidade maior de finos e conseqüentemente maior absorção de água. A figura 9 mostra o cone já posicionado e invertido após o ensaio de *slump* do traço com 0% de adição e os aparatos utilizados para a realização do mesmo.

Figura 9 – Ensaio de abatimento de cone (*slump test*)(a) cone após a remoção (b) medição da altura do abatimento



(a)

(b)

(fonte: foto tirada pelo autor)

É importante salientar que os concretos produzidos com o pó de rolagem de ágata apresentaram coloração mais escura que o concreto sem o resíduo. Outro aspecto interessante é que os traços com PRA necessitaram de mais água na mistura para a mesma trabalhabilidade. As relações água/cimento ficaram no intervalo de 0,58 a 0,66 e os abatimentos ficaram no intervalo delimitado de  $100 \pm 20$  milímetros conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10 – Relação água cimento dos traços e abatimento pelo slump test

Traço	Cimento (kg)	água (kg)	a/c	Abatimento (mm)
0%	11,11	6,43	0,58	90
15%	11,11	6,69	0,60	110
30%	11,11	7,01	0,63	100
45%	11,11	7,31	0,66	100

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.4.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizadas formas cilíndricas de 20x10cm de acordo com a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). As fôrmas foram posicionadas sobre uma mesa vibratória, moldadas pelo mesmo operador e vibradas por 20s cronometrados (FIGURA 10a). Cada mistura gerou 16 corpos de prova, que foram colocados em local adequado (FIGURA 10b), coberto com lona plástica para evitar a perda de água para o ambiente e, só então, devidamente identificados com selo na parte superior.

Figura 10 – (a) CPs sendo vibrados e (b) realocados em local adequado após moldagem



(a)

(b)

(fonte: foto tirada pelo autor)

#### 4.4.3 Cura

Transcorridas 24 horas da concretagem, a lona plástica que protegia os corpos de prova foi removida, após isso eles foram desmoldados, identificados com caneta para marcação na superfície lateral dos cilindros e alocados em câmara úmida ( $UR \geq 95\%$  e  $T = 23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) com temperatura e umidade controlada até a idade de 28 dias, quando iniciou-se a etapa de ensaios. É importante a cura em ambiente controlado pois favorece as reações tardias da hidratação do cimento, responsáveis por ganho de resistência e fechamento dos poros. Os corpos de provas utilizados para o ensaio de resistência à compressão com 28 dias foram retirados um dia antes, visto que precisavam passar pelo processo de retificação, onde suas

superfícies superior e inferior são regularizadas a fim de evitar acúmulo de tensões quando prensados.

## 4.5 ENSAIOS REALIZADOS

Nos itens a seguir serão apresentados a descrição dos ensaios realizados, bem como as normas brasileiras que apresentam os procedimentos.

### 4.5.1 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão respeitou os aspectos delimitados na norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), que prescreve um método de ensaio para verificação da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos. Foram ensaiados quatro corpos de prova para cada traço produzido, todos na idade de 28 dias. Os CPs foram retirados da câmara úmida e retificados (FIGURA 11). Os CPs tiveram seu diâmetro (D) e altura (h) medidos três vezes cada com paquímetro com resolução menor ou igual a 0,1 milímetros, sendo então calculada uma média dos valores obtidos. A norma estabelece que seja calculada também a razão h/d (altura média /diâmetro médio), caso o valor seja menor que 1,94 é necessário que se faça correções; ao mesmo tempo em que nenhum deles pode ser maior que 2,02.

Figura 11 – Vista geral dos corpos de prova com superfície retificada



(fonte: foto tirada pelo autor)

#### **4.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral em concreto foi realizado conforme a norma NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). Os CPs utilizados neste ensaio pertencem à mesma família dos traços utilizados no ensaio anterior, ou seja, foram moldados a partir da mesma betonada e também passaram pelos mesmos processos de cura, no entanto foram retirados da câmara úmida aos 28 dias de idade, pois para esse ensaio, não se faz necessário que os corpos de prova passem pelo processo de retificação.

Foram ensaiados 4 CPs para cada traço, com o paquímetro mediu-se três diâmetros ortogonais e três alturas, em seguida calculou-se a média dos valores obtidos. O próximo passo foi posicioná-los dentro de um aparato e só então colocá-los dentro da prensa. Quando efetuada uma carga sobre a geratriz do corpo cilíndrico, suas fibras centrais tendem a se distanciar uma das outras, gerando o que se chama tração. O ensaio de tração por compressão diametral é demonstrado na figura 12.



Figura 12 – Ensaio de tração por compressão diametral



(fonte: foto tirada pelo autor)

### 4.5.3 Ensaio de absorção por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi regido pela norma NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). O ensaio consiste em medir a massa de um corpo de prova inicialmente seco, em diferentes tempos, após serem colocados em contato com uma lâmina d'água de  $5 \pm 1$ mm. Esta etapa de ensaio esta demonstrado na figura 13.

Figura 13 – Ensaio de absorção por capilaridade



(fonte: foto tirada pelo autor)

Durante o ensaio, foi necessário determinar a massa dos corpos de prova com 3, 6, 12, 24, 48 e 72 horas, contadas a partir da colocação destes em contato com a água. Após a medição os CPs devem retornar imediatamente ao recipiente de ensaio.

Transcorrida as 72 horas de ensaio, os corpos de prova são rompidos à tração por compressão diametral para uma análise visual da distribuição de água no seu interior.

A norma supracitada detalha que para o cálculo da absorção de água para cada corpo de prova em determinado intervalo de tempo. A equação 1 mostra a forma de cálculo da absorção por capilaridade.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade expressa em g/cm<sup>2</sup>;

m<sub>sat</sub> = massa saturada do corpo de prova após entrar em contato com lâmina d'água em determinado intervalo de tempo expresso em gramas (g);

m<sub>s</sub> = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2) °C, expresso em gramas (g);

S = área da seção transversal, expressa em cm<sup>2</sup>.

#### **4.5.4 Ensaio de determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica**

O ensaio de absorção de água por imersão total foi realizado conforme a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). As amostras utilizadas nesse ensaio possuem características semelhantes às utilizadas anteriormente, assim como pertencem à mesma família. Foram ensaiados 4 CPs para cada um dos concretos produzidos com diferentes teores de PRA. As verificações de massa foram realizadas tanto em balança de precisão como em balança hidrostática (figura 14).

Figura 14 – Vista geral da verificação da massa do corpo de prova em balança hidrostática



(fonte: foto tirada pelo autor)

A norma define as seguintes equações para a obtenção dos valores de absorção, índice de vazios e massa específica da amostra seca:

A absorção é calculada pela equação 2.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

A= Absorção total em porcentagem

$m_{sat}$ = massa saturada do corpo de prova após imersão e fervura;

$m_s$ = massa do corpo de prova seco em estufa.

O índice de vazios ( $I_v$ ) também é apresentado em porcentagem, e obedece a seguinte expressão (equação 3):

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$m_{sat}$ = massa saturada do corpo de prova após imersão e fervura;

$m_s$ = massa do corpo de prova seco em estufa.

$m_i$ = massa saturada da amostra saturada medida através da balança hidrostática após a fervura.

A massa específica ( $\rho_s$ ) é adimensional e foi calculada pela equação 4.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$m_{sat}$ = massa saturada do corpo de prova após imersão e fervura;

$m_s$ = massa do corpo de prova seco em estufa.

$m_i$ = massa saturada da amostra saturada medida através da balança hidrostática após a fervura.

#### 4.5.5 Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Também foi realizado o ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica de acordo com a NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) o qual busca verificar a homogeneidade do concreto de forma não destrutiva, tal como eventuais falhas internas ocorridas durante as etapas de concretagem ou cura. Foram então ensaiadas quatro amostras para cada traço, antes de realizar a medição pelo ultrassom, retificou-se os CPs para eliminar as imperfeições das superfícies. Utilizou-se o paquímetro para medir três diâmetros e três alturas obtendo assim as respectivas médias dos valores. Com o equipamento de ultrassom montado, fez-se a calibração do instrumento, conforme indicado pelo fabricante (a norma não define valores específicos para frequência da onda, apenas que seja maior que 20 kHz), aplicando um lubrificante nas extremidades dos transdutores e posteriormente encosta-las nas superfícies retificadas da amostra. Por fim, registra-se os valores de velocidade e tempo de propagação de onda.

#### 4.5.6 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Em posse dos dados obtidos da massa específica seca e dos valores da velocidade de propagação ultrassônica, pode-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico (MED) dos concretos ensaiados, cuja fórmula está detalhada na norma britânica BS 1881/Part 209 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1990). O cálculo está representado na equação 5, onde pode-se observar que há de se arbitrar um coeficiente de Poisson para o cálculo dos resultados, estudos recentes realizados por Moura (2007) e também por Benetti (2012) utilizaram o valor de 0,20 para amostras de concreto, Mehta e Monteiro (2014) estabelecem

que o coeficiente de Poisson para concretos deve ficar no intervalo de 0,15 e 0,20. Sendo assim, foi arbitrado o valor de 0,20 para esta pesquisa.

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

$V$  = velocidade de propagação (km/s)

$\mu$  = coeficiente de poisson

Mehta e Monteiro (2014) citam que o módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e geralmente é 20, 30 e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estáticos para concretos de alta, média e baixa resistência respectivamente. Os autores ainda complementam que o cálculo deste módulo é muito importante para estruturas que sofrem de ações agressivas da natureza, como terremotos e grandes cargas de impacto.

## **5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios, uma verificação estatística, bem como uma análise dos valores obtidos.

### **5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO**

Neste trabalho foram realizados os dois principais ensaios para a verificação do desempenho mecânico de um concreto. São eles: o ensaio de resistência à compressão axial e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

#### **5.1.1 Resistência à compressão axial**

A resistência à compressão é, por muitos, considerada o atributo mais importante quando relacionado a resistência de estruturas de concreto. Os ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndrico são utilizados por grande parte das construtoras, para verificar se o concreto adquirido e utilizado em obra atinge o a resistência contratada e solicitada em projeto. Os valores obtidos dos ensaios para os traços com diferentes teores de resíduo, encontram-se na tabela 11.

Tabela 11 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias

% de PRA	Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)	Média do Concreto (Mpa)	Relação a/c	Desvio Padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
0	1	22,1	25,96	0,58	3,15	12,12
	2	24,4				
	3	29,1				
	4	27,5				
15	1	28,8	28,44	0,60	4,10	14,41
	2	28,6				
	3	28,3				
	4	20,4				
30	1	25,4	25,74	0,63	0,87	3,36
	2	24,4				
	3	26,3				
	4	26,0				
45	1	31,5	27,34	0,66	2,37	8,68
	2	28,1				
	3	26,5				
	4	26,6				

(fonte: elaborado pelo autor)

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA), para verificar a significância das variáveis controladas, com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. O resultado é demonstrado na tabela 12.

Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão uniaxial

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	F	p	Significância
% PRA	16,83	3	5,61	0,679	0,5817	Não
Erro	99,16	12	8,26			

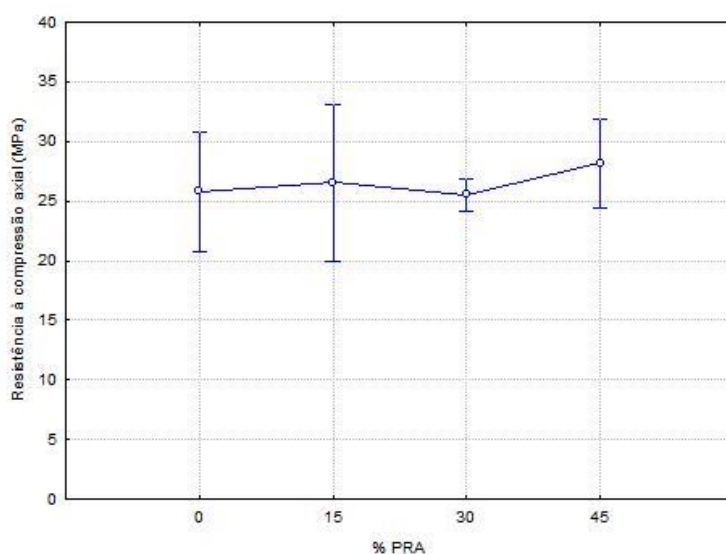
p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Com base nos resultados obtidos pela análise de variância, observa-se que a variável estudada não é considerada significativa, pois o valor de “p” ficou em torno de 58%, muito acima dos 5%, limite máximo para uma variável ser considerada significativa. De certa forma, pode-se

afirmar que adicionar o pó de rolagem de ágata em substituição ao agregado miúdo de calcário não interfere na resistência à compressão, quando utilizado em teores de até 45%. Na 15 observa-se o grande coeficiente de variação encontrado durante este ensaio, o que pode ter contribuído para que os dados se tornassem não significativos.

Figura 15 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de pó de rolagem de ágata na resistência à compressão uniaxial aos 28 dias



As grandes amplitudes visualizadas na figura 15 representam a grande variação dos resultados medidos para a resistência à compressão no mesmo traço; isso pode ter sido causado por diversos fatores, desde a moldagem até mesmo a retificação do corpo de prova. O traço de referência apresentou resistência de 22,1 a 29,1MPa, uma variação muito grande para a mesma mistura de concreto; o traço com 15% de substituição apresentou três valores muito próximos à média com variação entre 28,3 e 28,8MPa e um distinto 20,4MPa, acabando por interferir significativamente no coeficiente de variação; o traço com 30% se mostrou mais homogêneo e obteve variação de 3,36% ; o traço de 45% também teve resultados discrepantes com variação de 8,68, entretanto um dos corpos de prova apresentou a maior resistência à compressão de todos os traços, com o valor de 31,5MPa aos 28 dias. É interessante destacar que o teor de 45% de PRA, mesmo com uma relação água/cimento maior apresentou uma média de resistência maior que todos os outros traços.



Estatisticamente, quando um valor difere até 2 desvios padrões, pode ser considerado um valor espúrio. Para o traço de 15%, o valor de resistência à compressão obtidos com o corpo de prova número 4 foi de 20,4MPa, a média do traço ficou em 28,44 e o desvio padrão de 4,10, pode-se então descartá-lo. Refazendo os cálculos sem o valor do quarto corpo de prova, tem-se média de 28,56MPa; desvio padrão de 0,2054; e um novo coeficiente de variação de 0,7%.

### **5.1.2 Resistência à tração por compressão diametral**

Analogamente ao ensaio de resistência à compressão, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral é muito importante para avaliar o comportamento e a qualidade das estruturas de concreto, quando cargas forem aplicadas sobre elas. Sabe-se que a resistência à tração de um concreto se aproxima de 10% do valor de resistência à compressão, sendo, portanto, um valor muito baixo, por esse motivo as vigas acabam por receber uma armadura de aço, normalmente na parte inferior, para trabalhar concomitantemente ao concreto endurecido.

A tabela 13 informa os resultados obtidos através do ensaio.

Tabela 13 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade

% de PRA	Corpo de prova	Resistência à tração (Mpa)	Média do Traço (Mpa) Calc.	Relação a/c	Desvio Padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
0	1	2,9	2,90	0,58	0,15	5,19
	2	2,9				
	3	2,7				
	4	3,1				
15	1	3,3	2,84	0,60	0,55	19,39
	2	2,8				
	3	2,9				
	4	2,0				
30	1	2,8	2,68	0,63	0,31	11,49
	2	2,5				
	3	2,9				
	4	2,3				
45	1	2,8	2,51	0,66	0,19	7,58
	2	2,5				
	3	2,4				
	4	2,6				

(fonte: elaborado pelo autor)

Pela tabela 13 apresentada, percebe-se que o coeficiente de variação apresentado por todos os traços foi muito elevado, todavia as médias obtidas demonstram um comportamento quase linear, demonstrando um decréscimo da resistência conforme aumenta-se a quantidade do resíduo de PRA. Utilizando o mesmo critério de eliminação de valores espúrios para resistência à compressão de  $[-2,0 \cdot \text{desvio padrão global}; +2,0 \cdot \text{desvio padrão global}]$ , nenhuma amostra foi considerada espúria. Apesar do número elevado apresentado no coeficiente de variação, nenhum valor ficou fora do intervalo estipulado.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA), para verificar a significância das variáveis controladas, com fatorial cruzada a partir do software Statística 7. O resultado é demonstrado na tabela 14.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) – Resistência à tração por compressão diametral

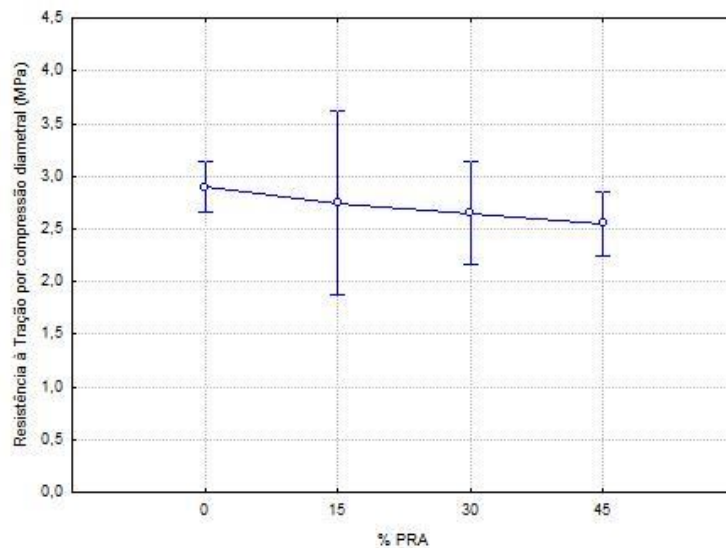
	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	F	p	Significância
% PRA	0,2629	3	0,0876	0,767	0,534	Não
Erro	1,37	12	0,1142			

p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Analisando os resultados percebe-se que o nível de significância (p) apresentou valor superior a 0,05; portanto os valores foram considerados não significativos, ou seja, apesar do decréscimo linear verificado nas médias, não pode-se afirmar que o pó de ágata, quando utilizado como material de substituição, interfere na resistência à tração dos corpos de prova testados. O programa também elaborou um gráfico (figura 16) demonstrando o efeito do pó de rolagem, bem como a grande variação obtida para cada um dos diferentes teores de adições testados.

Figura 16 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de pó de rolagem de ágata na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias



É possível atribuir a redução na resistência a tração por compressão diametral ao aumento da relação água/cimento. O teor de 0% obteve resistência média de 2,90MPa e sua relação água cimento era de 0,58. Já para o teor de 15%, onde a relação água/cimento aumentou para 0,60,

a resistência média reduziu à 2,84MPa. Este comportamento se manteve nos concretos produzidos com maiores teores de substituição, conforme aumentava-se a quantidade de água do traço, menor foi a resistência à tração média verificada.

### 5.1.3 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Por fim, na tabela 15 observam-se os valores obtidos pelo cálculo de módulo de elasticidade dinâmico dos traços.

Tabela 15 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias

% de PRA	Corpo de prova	MED (Gpa)	Média (GPa)	Relação a/c	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	1	43,166	40,43	0,58	1,85	4,57
	2	39,920				
	3	38,827				
	4	40,945				
15	1	40,989	41,63	0,60	2,07	4,98
	2	42,266				
	3	38,487				
	4	43,293				
30	1	43,237	40,17	0,63	3,61	8,99
	2	37,910				
	3	35,696				
	4	42,422				
45	1	40,373	37,88	0,66	2,59	6,83
	2	39,226				
	3	36,525				
	4	34,665				

(fonte: elaborado pelo autor)

Como o MED se utiliza da velocidade de propagação ultrassônica para cálculo, pode-se afirmar que o módulo reduz de forma proporcional à porosidade e inversamente proporcional a densidade dos corpos de prova; quanto mais poroso, menor a capacidade de deformação do material. Em materiais heterogêneos como o concreto, o comportamento elástico da amostra depende da característica de cada um dos componentes, assim como sua fração volumétrica, a

densidade e as características das zonas de transição na interface (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Realizou-se então análise de variância dos resultados obtidos através do anova. A tabela 16 apresenta os valores obtidos pelo programa, o qual verificou que o pó de rolagem de ágata em substituição ao agregado miúdo de calcário não exerce influência significativa quanto ao módulo de elasticidade dinâmico de concreto.

Tabela 16 – Análise de variância do MED em programa computacional estatístico

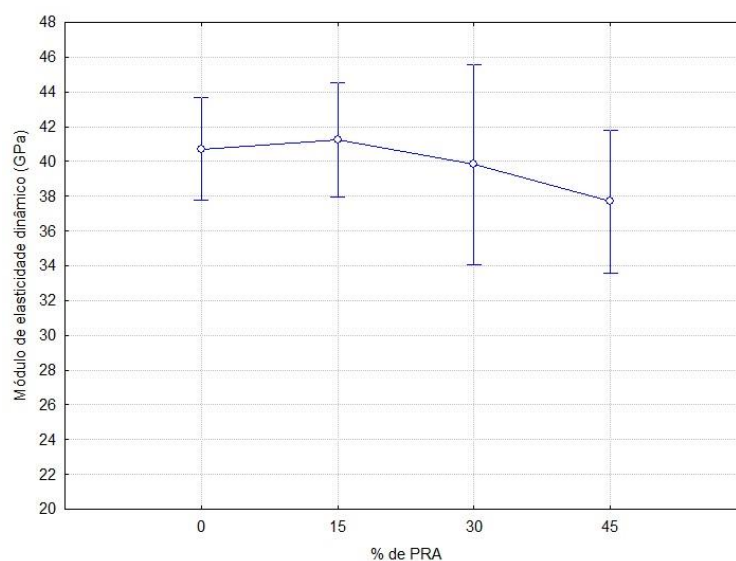
	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média quadrática</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
% PRA	29,46	3	9,82	1,431	0,282174	Não
Erro	82,33	12	6,86			

p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Através da figura 17 estão demonstrados os resultados obtidos e as variações observadas. Desta maneira, pode-se salientar que a tendência é de uma redução do módulo de elasticidade, conforme se aumenta a relação água/cimento dos teores, no entanto ao substituir 15% do AMC por PRA, observou-se um ganho de módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 17 – Médias e coeficiente de variação do MED em concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias



Fazendo uma análise dos resultados obtidos para resistência mecânica, a verificação estatística comprovou que a utilização de diferentes teores de pó de rolagem de ágata não gera influência significativa nos resultados obtidos. Desta forma podemos atribuir a menor capacidade de resistir a esforços de tração e compressão desse concreto, bem como sua capacidade de deformar, a maior quantidade de água utilizada nos concretos com maior quantidade de substituição.

## 5.2 ANÁLISE DE DURABILIDADE DO CONCRETO

Foram realizados dois ensaios utilizados como indicativo de durabilidade dos concretos produzidos, são eles: o ensaio de absorção por capilaridade, o ensaio por imersão total e ensaio de verificação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

### 5.2.1 Absorção de água por capilaridade

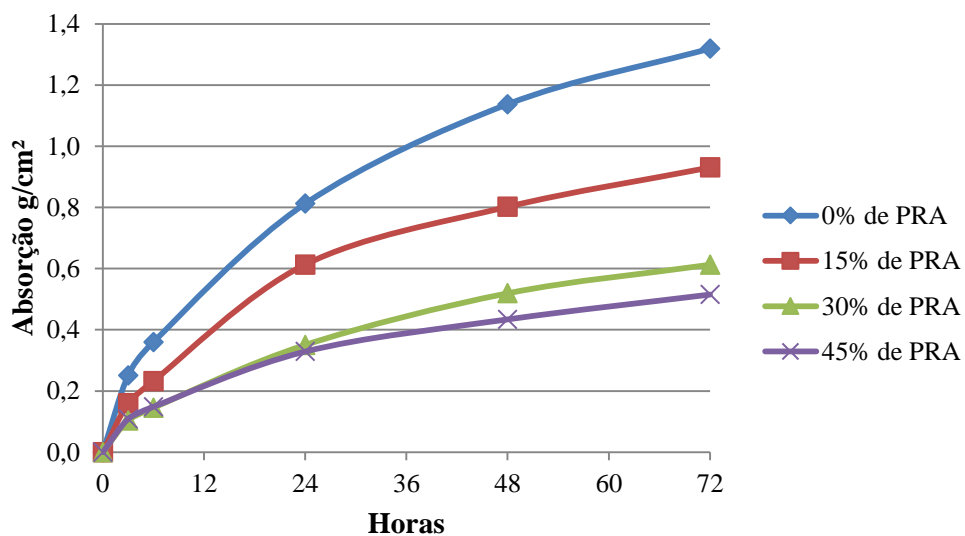
A tabela 17 indica a média de água absorvida ao longo do tempo, ao passo que a figura 18 apresenta a absorção de água por capilaridade calculada a partir destas medições.

Tabela 17 – Absorção média de água por capilaridade ao longo do tempo(g/cm<sup>2</sup>) de concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo por resíduo de PRA

Amostra	0h	3h	6h	24h	48h	72h
0%	0	0,2505	0,36	0,8121	1,1372	1,3192
15%	0	0,1603	0,2322	0,6132	0,8019	0,9304
30%	0	0,1038	0,1452	0,3504	0,5192	0,6125
45%	0	0,1085	0,1484	0,3289	0,4339	0,5151

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Média dos valores de absorção por capilaridade para os diferentes teores de PRA medidos em intervalos normalizados



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 18, percebe-se que inicialmente os traços com 30 e 45% de resíduo se comportaram de forma semelhante até o período de 24 horas, entretanto passado 72 horas de ensaio o traço com 45% de PRA se mostrou mais eficaz nesta redução. O traço com 15% já nas horas iniciais apresentava indícios de uma redução significativa de absorção por capilaridade quando comparado ao traço de referência, tendência esta que se confirmou no final do experimento, quando verificou-se uma redução de 36%. Os corpos de prova com 30% de PRA reduziram em 53% a absorção, já os CPs de 45% absorveram 60% menos que o concreto de referência.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA), buscando verificar a significância das variáveis controladas, com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. A tabela 18 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) – Absorção por capilaridade

	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média quadrática</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
% PRA	1,55	3	0,52	31,242	0,000006	Sim
Erro	0,2	12	0,02			

p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Com base na tabela 18 pode-se notar que o pó de rolagem de ágata interferiu significativamente na quantidade de água absorvida por cada corpo de prova, isso só é possível porque o valor calculado de nível de significância (p) foi muito inferior a 5%.

A 19 apresenta as médias, desvio padrão e o coeficiente de variação para cada traço ensaiado, percebe-se que o traço com 15% de PRA apresentou elevado índice de variabilidade, contudo nenhum dado foi considerado espúrio, porque permaneceram no intervalo de dois desvios padrões para mais ou para menos.



Tabela 19 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na absorção por capilaridade, aos 28 dias

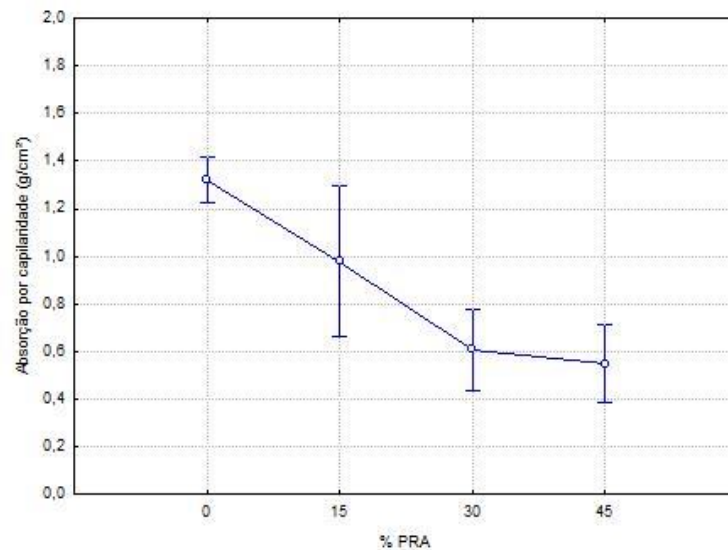
% de PRA	Corpo de prova	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )	Média do Traço Calc.	Relação a/c	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	1	1,3503	1,32	0,58	0,06	4,61
	2	1,3855				
	3	1,288				
	4	1,2501				
15	1	0,9258	0,93	0,60	0,20	21,46
	2	1,2599				
	3	0,9351				
	4	0,7895				
30	1	0,4746	0,61	0,63	0,11	17,69
	2	0,5715				
	3	0,7265				
	4	0,6536				
45	1	0,4596	0,52	0,66	0,10	20,06
	2	0,6963				
	3	0,5211				
	4	0,5091				

(fonte: elaborado pelo autor)

A absorção verificada nos traços com substituição de PRA apresentou elevado índice de variabilidade nos resultados. Quando utilizado 15% de substituição de PRA, o coeficiente de variação ficou em 21,46%; o concreto com 45% também apresentou valores acima de 20%, valores considerados altos para o ensaio.

A figura 19 mostra os valores de absorção e suas respectivas variabilidades, representada pelas amplitudes de cada ponto.

Figura 19 – Influência dos teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de pó de rolagem de ágata na absorção por capilaridade



Pelos dados obtidos pode-se afirmar que o pó de rolagem de ágata é extremamente eficiente na redução de absorção por capilaridade, verifica-se que ocorreu uma redução significativa da absorção por capilaridade dos traços com adição para com o traço de referência, chegando à alcançar 61% a menos de absorção no traço com 45% de substituição. O traço de 30% de PRA reduziu em 53% e, por último, o traço com 15% provocou uma redução de 29% a absorção.

Estes resultados também foram verificados por Petry (2015), quando esta utilizou o mesmo resíduo de pó de rolagem de ágata em substituição ao agregado miúdo de calcário, em argamassas. Observou-se uma redução significativa na absorção por capilaridade, principalmente nas argamassas com altos teores de substituição. Outro fator interessante, que corrobora com a discussão, é que os teores com 30 e 45% de substituição em argamassas, obtiveram resultados semelhantes, sendo possível afirmar que a tendência de redução da absorção capilar vai estabilizando conforme aumenta-se os teores de substituição. Como para traços com grandes teores de PRA é necessário uma maior quantidade de água, e isso acarreta em perda de resistência, há de se fazer uma verificação das prioridades para qual o concreto será produzido.

Os resultados indicam que a substituição do agregado miúdo de calcário pelo PRA muda a dimensão e a conectividade dos capilares, o que não significa que ocorra a redução do índice de vazios dos concretos. Isso pode ser causado devido ao efeito fíler gerado pelo resíduo, alguns estudos como o realizado por Silva et al. (2009) verificaram que a adição de finos em argamassas reduziu a absorção de água através dos capilares do concreto.

Gonçalves (2000) observou comportamento semelhante em sua pesquisa, onde foi possível identificar redução na absorção por sucção capilar, ao utilizar adição de 10% de resíduo de corte de granito, em concretos de cimento Portland. O autor atribuiu essa melhora de desempenho ao maior refinamento da estrutura de concreto causada pela dispersão do resíduo da mistura, e conseqüente preenchimento dos vazios existentes, formando uma barreira física para a penetração da água.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o aumento da relação água/cimento gera acréscimo de porosidade. No entanto, os traços com maiores teores de substituição necessitaram maior quantidade de água para o mesmo abatimento, isto evidencia ainda mais a eficácia do resíduo de pó de rolagem de ágata, visto que mesmo demandando maior quantidade de água, acabou por reduzir a absorção capilar.

Posteriormente à medição, a norma estabelece que os corpos de prova devem ser rompidos diametralmente para uma análise da ascensão capilar na parte interna da amostra (figura 20a), com a ascensão máxima anotada e sua distribuição desenhada. No entanto, após romper um corpo de prova para cada traço, não foi possível realizar essa análise visual da parte interna devido à cor branca do concreto. É perceptível um leve escurecimento das amostras perto às superfícies (figura 20b), mesmo assim não era possível quantificá-las.

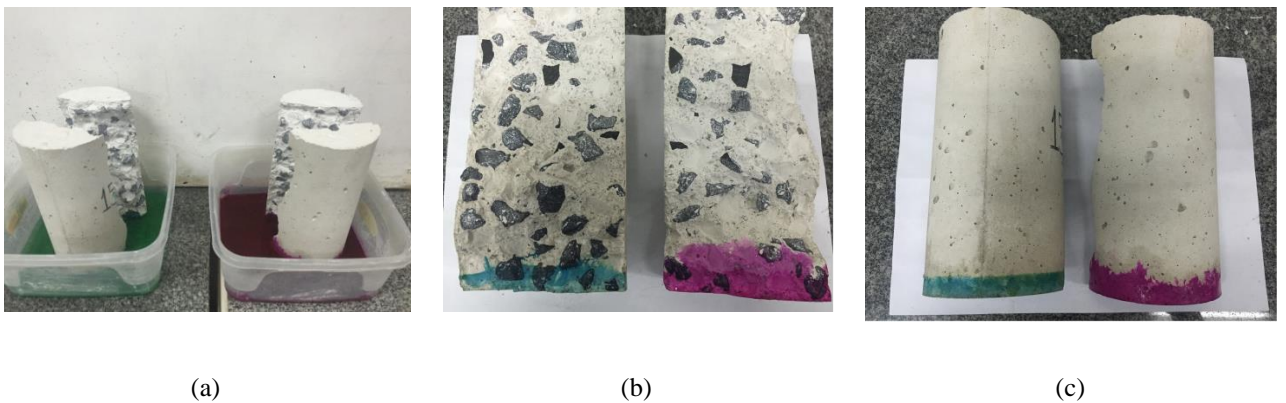
Figura 20 – Análise visual do perfil de umidade (a) lado externo do CP; (b) lado interno



(fonte: elaborado pelo autor)

Como os resultados da análise visual não se mostraram conclusivos, decidiu-se repetir os ensaios com os 12 corpos de prova restantes, três de cada traço, mas dessa vez utilizando corante na água. Experimentou-se dois tipos de corantes um verde e outro rosa nas amostras já rompidas, para verificar qual tinha comportamento mais significativo, as amostras foram secas por 72 horas na estufa e então colocadas para teste por 24 horas. O desempenho do corante rosa foi considerado mais eficiente, pois o corante verde apenas manchou onde permaneceu em contato com a água, conforme figura 21.

Figura 21 – Teste não normatizado de eficiência de corante para marcação do perfil de umidade (a) CPs em vasilhames com lâmina d'água com corante verde e rosa; (b) vista superior do CP evidenciando o perfil de umidade na parte interna; (c) vista superior do CP na parte externa

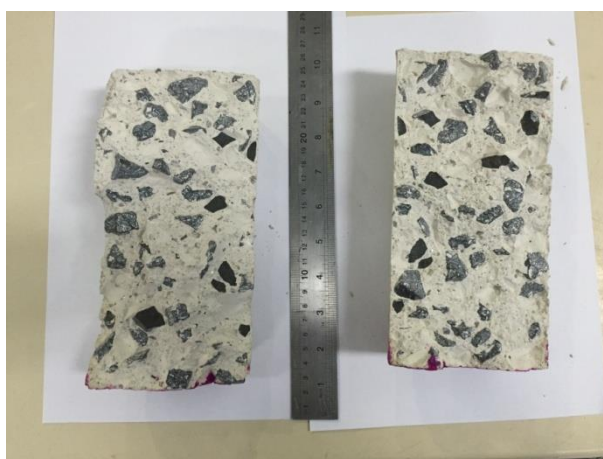


(fonte: elaborado pelo autor)

O corante rosa escolhido e utilizado foi o RODAMINA B, da família dos sais que apresenta coloração rosa forte e é facilmente solúvel em água.

Ao repetir o ensaio de absorção por capilaridade não foram realizadas novas leituras de variação de massa, pois a quantidade de água absorvida já havia sido verificada. O objetivo principal era fazer uma análise visual da água absorvida internamente após as 72 horas de ensaio, para isso os insumos restantes foram rompidos diametralmente e analisados visualmente. A figura 22 mostra que novamente, não houve nenhum tipo de manchamento interno significativo, tanto nos traços com PRA quanto no traço de referência.

Figura 22 – Inspeção visual interna dos corpos de prova quando ensaiados com corante



(fonte: elaborado pelo autor)

Atribui-se esta melhora de desempenho ao refinamento da mistura causado pela utilização do pó de rolagem de ágata, preenchendo os interstícios do concreto principalmente na superfície do corpo de prova, onde supostamente o PRA trabalhou como agente impermeabilizante.

### **5.2.2 Absorção por imersão**

O ensaio de absorção por imersão total do corpo de prova diverge do ensaio de capilaridade por ser considerado mais agressivo, sujeitando a amostra a condições extremas com altas

temperaturas quando imerso em água. A tabela 20 apresenta os resultados obtidos, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação calculado para cada traço.

Tabela 20 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na absorção por imersão total, aos 28 dias

% de PRA	Corpo de prova	Absorção (%)	Média do traço (%)	Relação a/c	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0%	1	6,037	6,273	0,58	0,23	3,65
	2	6,205				
	3	6,578				
	4	6,341				
15%	1	6,362	6,475	0,60	0,21	3,17
	2	6,833				
	3	6,487				
	4	6,463				
30%	1	6,044	6,673	0,63	0,73	10,99
	2	7,114				
	3	7,595				
	4	6,232				
45%	1	6,353	6,858	0,66	0,32	4,64
	2	6,71				
	3	7,007				
	4	7,035				

(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados então foram analisados para a verificação da significância da variável controlada, com fatorial cruzada pelo software Statistica 7. Os valores disponibilizados pelo programa foram colocados na tabela 21.

Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) – Absorção por imersão total

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	F	p	Significância
% PRA	0,60758	3	0,20253	1,10516	0,3851	Não
Erro	2,19905	12	0,18325			

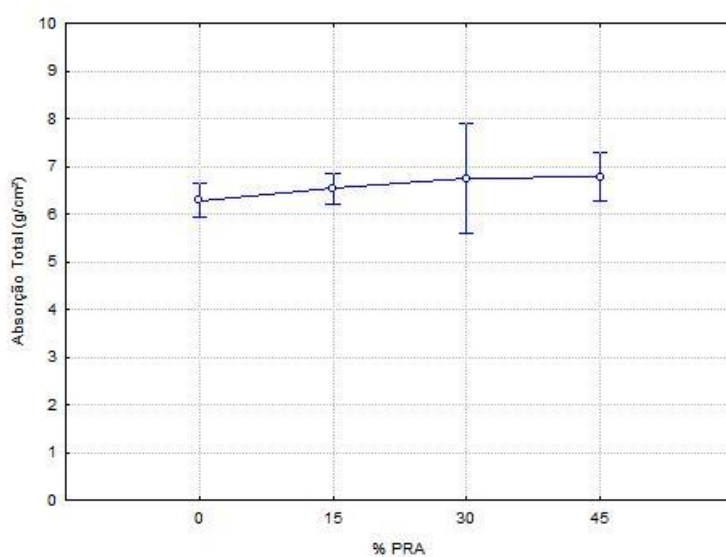
p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Percebe-se que o valor obtido para o nível de significância, representado pela letra “p”, foi maior de 0,05, limite para que a atuação do PRA fosse considerado significativo. Sendo assim, não se pode afirmar que substituir o agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata acarretará em um aumento da absorção de água pela estrutura de concreto.

A 23 demonstra o comportamento quase linear das médias obtidas e destaca a grande variação apresentada pelo traço com 30% de resíduo. Os teores de referência e com 15% de adição, absorveram em média 6,27% e 6,47% respectivamente; já o teor de 30% absorveu 6,67%, este traço foi o que apresentou um coeficiente de variação de aproximadamente 11%, valor mais significativo neste ensaio. O teor de 45% foi o que obteve a maior absorção com o valor de 6,85%.

Figura 23 – Médias e coeficiente de variação do ensaio de absorção de água por imersão total para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias



### 5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CONCRETO

Com os valores das medições realizadas durante o ensaio de absorção, a norma estabelece que é possível identificar o Índice de vazios e a Massa específica da amostra seca, o que foi

calculado nesta terceira e última etapa do trabalho. Também realizou-se o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.

### 5.3.1 Índice de vazios

O índice de vazios de cada amostra foi calculado e estão descritos na tabela 22.

Tabela 22 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata no índice de vazios, aos 28 dias

Traço	Corpo de prova	Índice de vazios (%)	Média do traço (%)	Relação a/c	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0%	1	14,22	14,69	0,58	0,44	3,00
	2	14,54				
	3	15,25				
	4	14,84				
15%	1	14,48	14,95	0,60	0,56	3,77
	2	15,82				
	3	15,03				
	4	14,88				
30%	1	13,91	15,14	0,63	1,46	9,64
	2	16,09				
	3	16,92				
	4	14,19				
45%	1	14,32	15,33	0,66	0,62	4,03
	2	15,20				
	3	15,75				
	4	15,47				

(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados calculados do índice de vazios foram colocados sob análise de variância, visando observar a significância das variáveis controladas, com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. O resultado é apresentado pela tabela 23.



Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) – Índice de vazios

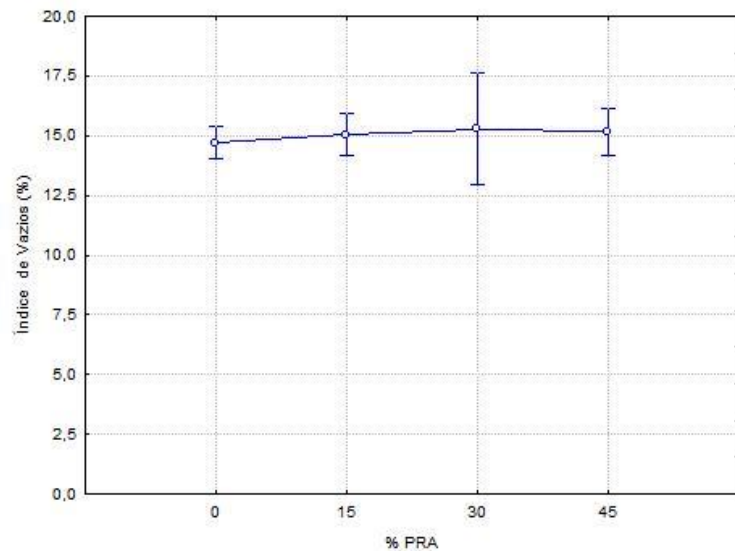
	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	F	p	Significância
% PRA	0,72968	3	0,24323	0,32163	0,80968	Não
Erro	9,07492	12	0,75624			

p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Analisando a tabela 23 é possível verificar que, a substituição do agregado calcário por pó de ágata não afeta o índice de vazios de forma significativa, pois o valor obtido para “p” foi de 80%, muito acima do limite de 5% estabelecidos estatisticamente. Na figura 24, onde apresenta-se o desempenho dos traços ensaiados e sua variabilidade, é possível identificar que a quantidade média do índice de vazios se mantém quase constante. A substituição do agregado miúdo de calcário pelo resíduo e aumento da quantidade de água nos concreto com altos teores de PRA, não interferiram na quantidade de vazios presentes nas amostras.

Figura 24 – Médias e coeficiente de variação dos índices de vazios para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias



### 5.3.2 Massa específica da amostra seca

As massas específicas das amostras secas para os diferentes teores também foram calculados e estão descritos na tabela 24.

Tabela 24 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na massa específica da amostra seca, aos 28 dias

% de PRA	Corpo de prova	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média do traço (g/cm <sup>3</sup> )	Relação a/c	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	1	2,355	2,342	0,58	0,02	0,65
	2	2,343				
	3	2,318				
	4	2,341				
15	1	2,275	2,309	0,60	0,02	0,84
	2	2,315				
	3	2,317				
	4	2,302				
30	1	2,301	2,27	0,63	0,03	1,36
	2	2,262				
	3	2,227				
	4	2,277				
45	1	2,254	2,251	0,66	0,03	1,3
	2	2,265				
	3	2,247				
	4	2,199				

(fonte: elaborado pelo autor)

Após a análise de variância pelo ANOVA, obteve-se os seguintes resultados apresentados na figura 25. É possível interpretar na tabela 25 que o valor de significância obtido foi de 0,006%, essa informação corrobora com o fato de que o teor de pó de rolagem de ágata aplicado na mistura de concreto interfere diretamente na massa específica do mesmo.

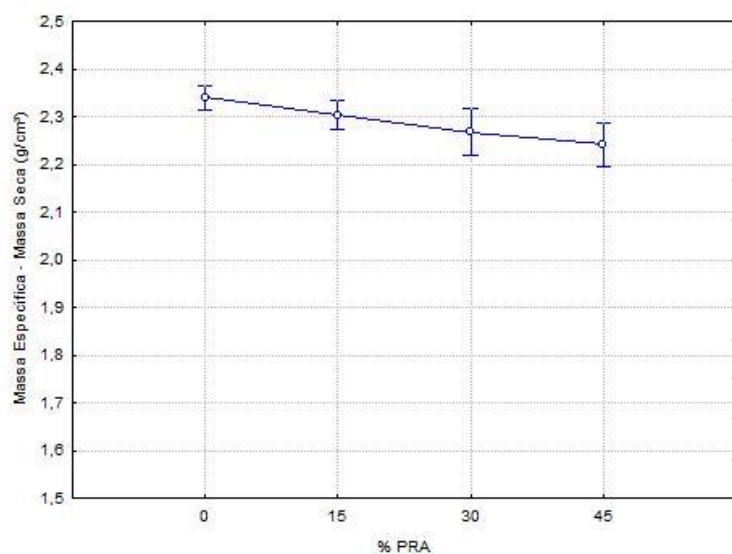
Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) – Massa específica da amostra seca

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	F	p	Significância
% PRA	0,02196	3	0,00732	12,0462	0,0006	Sim
Erro	0,00729	12	0,00061			

p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

Figura 25 – Médias e coeficiente de variação da massa específica para concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias



Com os resultados obtidos, observa-se que quanto maior a quantidade de PRA utilizado, menor será a massa específica seca do concreto. O traço de referência possui uma massa específica de 2,342 g/cm<sup>3</sup>, já os traços com 15, 30 e 45% de substituição foram decrescendo, atingindo os valores de 2,309 ; 2,270 e 2,251 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, isso ocorre devido ao fato de que o pó de rolagem de ágata apresenta massa específica menor que o agregado miúdo de calcário, isso acarreta em redução da massa especificado concreto.

Ao correlacionar os resultados de absorção por capilaridade e massa específica, supõe-se que: apesar de os concretos com PRA possuírem uma massa específica inferior ao traço de referência, não significa que há maior quantidade de vazios internos, dado que não ocorreu maior absorção por parte dos concretos com algum teor de resíduo. Contudo, percebe-se claramente que a redução da massa específica atuou de forma direta na descontinuidade capilar, ou seja, gerou uma barreira para a ascensão da água.

### 5.3.3 Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Uma das formas de saber a quantidade de vazios dentro de um corpo de prova é através do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, este ensaio foi realizado entre o processo de secagem dos corpos de prova do ensaio de absorção e a colocação dos mesmos imersos dentro do banho de água. Os resultados fornecidos pelo equipamento de ensaio - velocidade e tempo de propagação - são apresentados na tabela 26.

Tabela 26 – Influência do teor de substituição de agregado miúdo por resíduo de pó de ágata na velocidade de propagação de onda ultrassônica, aos 28 dias

% de PRA	Corpo de prova	Tempo (µs)	Velocidade medida (m/s)	Velocidade calculada (m/s)	Média da vel. calculada (m/s)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	1	44,0	4545	4512,9	4379,4	86,87	1,98
	2	45,6	4385	4350,7			
	3	45,7	4376	4313,7			
	4	44,9	4454	4408,2			
15	1	43,9	4555	4474,0	4488,8	117,56	2,62
	2	42,9	4618	4503,6			
	3	46,2	4329	4295,7			
	4	42,2	4739	4571,3			
30	1	43,2	4629	4569,3	4432,5	172,97	3,90
	2	45,6	4385	4315,6			
	3	46,2	4329	4220,0			
	4	42,9	4662	4549,3			
45	1	44,2	4524	4461,3	4318,0	125,74	2,91
	2	45,1	4434	4386,4			
	3	45,7	4376	4249,7			
	4	46,7	4282	4185,4			

(fonte: elaborado pelo autor)

Mesmo com o aparelho fornecendo valores para velocidade, a norma define que esta grandeza deve ser calculada, pois se relaciona diretamente com a altura da amostra. Sabe-se que quanto maior a velocidade de propagação menos porosidade possui o concreto, pois há uma redução de velocidade da onda quando ela atravessa espaços vazios no interior da amostra.

Para saber se a influência do pó de rolagem de ágata na velocidade de propagação de onda ultrassônica é significativa, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), o que está demonstrado na tabela 27.

Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) – Velocidade de propagação de onda ultrassônica

	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média quadrática</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
% PRA	40836,15	3	13612,05	0,81148	0,51168	Não
Erro	201291,14	12	16774,26			

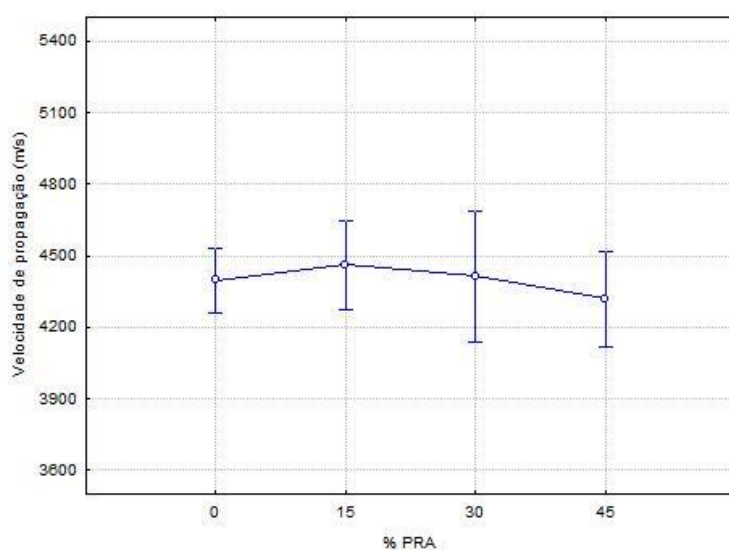
p: nível de significância; Se  $p \leq 5\%$  = efeito significativo

F: variação das médias

A influência da variável independente na variável dependente é verificada através do valor calculado em “p”, neste caso o valor obtido foi de 51,2%, muito maior que o limite estabelecido de 5%. Desta forma, não é possível afirmar que o PRA interfere na velocidade de propagação ultrassônica média dos concretos.

A figura 26 demonstra o comportamento verificado e suas respectivas variabilidades para cada traço.

Figura 26 – Médias e coeficiente de variação da velocidade de propagação ultrassônica em concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo, aos 28 dias



Ao analisar a figura 26, percebe-se que o traço com 30% de PRA apresentou uma variabilidade maior que os demais, entretanto quando comparado aos outros ensaios, a velocidade de propagação apresentou valores reduzidos de variabilidade, sendo considerado um ensaio muito eficiente para a verificação da porosidade do concreto.

Os valores obtidos estão coerentes com os encontrados no ensaio de absorção total, no qual verificou-se que a substituição do agregado miúdo de calcário por PRA, não alterou a porosidade, diferente do que foi observado no ensaio de massa específica.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal verificar o comportamento de concretos Portland branco com a substituição do agregado miúdo de calcário por resíduo de pó de rolagem de ágata em diferentes teores. Para ampliar os conhecimentos acerca do desempenho mecânico deste material foram realizados ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral; assim como para verificação da durabilidade, verificados através da absorção por capilaridade, absorção por imersão total, índice de vazios, massa específica da amostra seca, velocidade de propagação de onda ultrassônica e módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados obtidos por esses ensaios foram verificados estatisticamente visando analisar se a quantidade de pó de rolagem de ágata interferiu de forma significativa nos valores medidos pelo ensaio.

É importante ressaltar que as conclusões apresentadas não devem ser utilizadas como verdade absoluta à respeito da utilização do resíduo, ainda é necessário realizar novas pesquisas buscando complementar as informações obtidas nesse trabalho.

### 6.1 CONCLUSÕES

No quesito resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico, os valores obtidos através dos ensaios estatísticos foram considerados não significativo. Portanto, pode-se afirmar que substituir agregado miúdo de calcário por pó de rolagem de ágata nas porcentagens utilizadas, não interfere na resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral e no MED dos concretos.

Dentre os testes de durabilidade, o ensaio de absorção por capilaridade foi o que apresentou resultados significativos quando testados do ponto de vista estatístico, pois ficou comprovado que sim, o teor de resíduo de ágata utilizado, interfere diretamente na absorção das amostras. Observa-se que ao substituir o agregado miúdo de calcário por 15% de PRA, já foi possível notar uma redução de quase 30% na quantidade de água absorvida, tendência esta que

permaneceu conforme aumentava-se a quantidade do resíduo no traço, ou seja, quanto maior a quantidade de PRA, menor a absorção de água através dos capilares do concreto.

Em relação à absorção por imersão total, a diferença observada foi considerada não significativa, o mesmo foi constatado quanto ao índice de vazios apresentados pelas amostras de concreto. Sendo assim, não é possível afirmar que a substituição do agregado miúdo por PRA interfere na absorção total nem na quantidade de vazios presentes nos concretos.

Quanto à massa específica seca, o traço de referência apresentou massa específica média de 2,342 g/cm<sup>3</sup>, este valor decresce conforme se aumenta a quantidade de substituição. Entretanto essa redução é causada pela utilização do resíduo, que possui massa específica menor que a do agregado miúdo de calcário.

O ensaio de verificação de velocidade de propagação de onda ultrassônica, após análise estatística, estabeleceu que a inserção de PRA em substituição ao agregado miúdo de calcário

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho ainda ficaram pendentes algumas dúvidas sobre o comportamento do resíduo de pó de rolagem ágata, quando utilizados em concreto de cimento Portland branco em substituição parcial ao agregado miúdo de calcário. Alguns ensaios normatizados não apresentaram resultados tão satisfatórios, como forma de elucidar as dúvidas a cerca da influência do resíduo. Como o tempo pra realização de um TCC é muito reduzido, não foi possível solucionar todas as incógnitas existentes para a introdução de um material residual, utilizado em misturas de concreto, no mercado. Em razão disto sugere-se:

- a) verificar a estrutura do concreto com substituição de agregado miúdo de calcário por PRA na escala microscópica, buscando visualizar formatos dos minerais formados bem como os vazios internos;
- b) executar novos ensaios para verificar a resistência mecânica do concreto produzido, em especial o módulo de elasticidade das amostras;
- c) realizar outros ensaios de durabilidade como, por exemplo: análise de cloretos, visando descobrir novos benefícios gerados pelo material além daqueles já apresentados neste trabalho;
- d) realizar estimativa da pegada ambiental.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção da água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 42**: Cimento Portland: Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.**NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_.**NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007

\_\_\_\_\_.**NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.**NBR 7222**: Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_.**NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra- sônica. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_.**NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.**NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_.**NBR 10004**: Resíduos sólidos -Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

**BENETTI, J. K. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto.** Unisinos. São Leopoldo, 2012.

**BRANCO, P.; GIL, C. A. A. Mapa gemológico do Estado do Rio Grande do Sul.** 2ª Ed. rev. Atual. – Porto Alegre: CPRM: 2002.

BRANCO, P.; VIEIRO, A. I. N. I. **Mercado de gemas e pedras do Rio Grande do Sul.** Conselho em revista: matérias técnicas, Porto Alegre, n.4, p. 16-18. 2004. Disponível em: <[www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/04/index.htm](http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/04/index.htm)> Acesso em: 03 mai. 2017

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de agosto de 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em: 20 mai. 2017

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 001.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <[www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html)> Acesso em: 20 mai. 2017

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1.881: Part 209: Recommendations for a Measurement of Dynamic Modulus of Elasticity.** Londres, 1990

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** Pg. 115,: 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto.** Tese de Doutorado. UFRGS, 2013.

COSTA, A. B.. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.

FONSECA, A. A., NUNES, A. **Betão branco: fabrico, características e utilização estrutural.** In: Jornadas de Betão, 1995. **Anais.** Portugal: FEUO, 1995

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Tese de mestrado. UFRGS, 2000.

HEEMANN, R. **Geologia, controles e guias prospectivos para depósitos de ágata na região do Salto do Jacuí.** (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais da UFRGS. 107 p., 1997.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Vol. 1. Ibracon, Santa Maria, 2005

JACOBI, P. R.; BESEN, G R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade.** Estudos avançados, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos, Pg. 11. 2000.

JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M. M.; FISCHER, A. C.; LICCARDO, A.; CHODUR, N. L. **Potencial gemológico da região sul do Brasil.** In: Seminário sobre design e gemologia de pedras, gemas e jóias do Rio Grande do Sul, 2009. Soledade. Anais Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2009. P.1-6.

KEIL, F.; GONZÁLEZ, A. S. **Cemento: fabricación, propiedades, aplicaciones**. Editores Técnicos Asociados, 1973.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Pg. 230, 2001.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA A. C. F. **Emprego da escória de aciaria elétrica como adição a concretos**. In. SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. São Paulo, 2000. Anais. São Paulo, 2000, p. 1-19.

MASUERO, G. B.; **Características mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto após separação por densidade**. Porto Alegre, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. São Paulo: Ibracon, 2014.

MOURA, C. B. **Aderência de revestimentos externos de argamassa em substratos de concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco**. 2007.

PASSUELO, A.; SILVA, LCP. **Influência do tipo e teor de adições superpozolânicas nas características cromáticas de argamassas à base de cimento Portland branco estrutural**. 2004

PEREIRA, B. V. **Beneficiamento de ágata para a produção de materiais cerâmicos**. 2011.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco**. 2015.

PINTO, T. P.. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, J.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine ceramics in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 556-564, 2009.

VIEIRA FILHO, J. O. **Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos do broqueamento**. Pg. 63-64, 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.