

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

Silvia Mónica Ximeno Chiaro

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS BRANCOS
COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ÁGATA**

Porto Alegre
julho 2012

SILVIA MÓNICA XIMENO CHIARO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS BRANCOS
COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ÁGATA**

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: Ana Paula Kirchheim
Coorientadora: Francieli Tiecher Bonsembiante

Porto Alegre
julho 2012

SILVIA MÓNICA XIMENO CHIARO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS BRANCOS
COM AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ÁGATA**

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

Porto Alegre, 03 de julho de 2012

Prof^ª. Ana Paula Kirchheim
Dr^ª pela UFRGS
Orientadora

Prof^ª. Franciele T. Bonsembiante
Dr^ª pela UFRGS
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof./a Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Dra. pela Universidade de São Paulo

Prof./a Angela Borges Masuero (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao meu esposo, Luiz Carlos e a
minha filha Natália, que sempre me apoiaram e
especialmente durante o período do meu Curso de
Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me brindado com saúde e com as pessoas que colocou ao meu lado.

Agradeço ao meu esposo, Luiz Carlos, que com sua inesgotável paciência me incentiva em todos os meus sonhos para torná-los realidades.

Agradeço a minha filha Natália, que muito me fez crescer como pessoa, aprendendo a abdicar de algumas coisas e a lutar por tantas outras.

Agradeço aos meus pais por terem feito de mim quem eu sou, mesmo com erros ou acertos.

Agradeço à minha orientadora e amiga, Prof^a. Dra. Ana Paula Kirchheim, por ter me oferecido o projeto, pelo apoio nos momentos bons e ruins, pelas conversas incentivadoras, pelo acompanhamento e pela valiosa revisão do estudo.

Agradeço à minha coorientadora e amiga, Franciele Tiecher Bonsembiante, pelo apoio, por muitas conversas esclarecedoras e incentivadoras.

Agradecimento especial à Prof^a Denise Dal Molin por ter sempre uma palavra de apoio e por apresentar caminhos por onde parecia não haver mais um chão para pisar.

Agradecimento especial também à Prof^a Angela Borges Masuero, por ouvir tantos desabafos e me tranquilizar ou me impulsionar na tomada de decisões.

Agradeço à Professora Carin Schmitt por tantas revisões incansáveis feitas em meu trabalho.

Agradeço ao amigo, Airton, pelo companheirismo e dedicação nos momentos que precisei para desenvolver o programa experimental.

Aos professores, funcionários e colegas do NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação).

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita
fadiga e persistência.

Henri Ford

RESUMO

No estado do Rio Grande do Sul, há a terceira maior produção de pedras preciosas do Brasil, com etapas do beneficiamento de rochas, como a ágata gerando resíduos que requerem solução quanto ao seu destino final. Desta forma o aproveitamento de resíduos e subprodutos industriais na Construção Civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e contribuição para o desenvolvimento sustentável. A utilização destes como carga na produção de concretos e argamassas traz muitos benefícios, podendo incrementar as propriedades dos mesmos, além de possibilitar um destino sustentável a resíduos que, de outro modo, seriam dispostos em aterros industriais. Em observações realizadas, nos processos geradores do resíduo de ágata, percebeu-se que, em pó, apresentava-se com uma cor clara. Visto isso, se vislumbrou a possibilidade de sua utilização, em especial, em concretos brancos. A afirmativa se justifica pela necessidade de usar agregados que não sejam capazes de alterar a cor no acabamento final destes concretos, já que por vezes, em concretos brancos estruturais, se elimina o revestimento por motivos estéticos, bem como possibilitaria também, trabalhar com texturas e pigmentos. Assim o presente trabalho propõe estudar a possível influência causada pela substituição de agregados miúdos convencionais, por agregados miúdos reciclados de ágata, provenientes dos depósitos de rejeitos das empresas beneficiadoras dessas rochas. Para tal aproveitamento torna-se necessária, primeiramente, a caracterização da ágata. Resultados obtidos no estudo mostram que a rocha é composta por quartzo. Este mineral é conhecido por ocasionar, em concretos, a reação álcali-agregado, quando reage com os álcalis do cimento na presença de umidade. Assim este trabalho focalizou a propriedade de durabilidade do concreto como prioritária, verificando a viabilidade de sua utilização frente à referida reação. Dentre as formas existentes para avaliar a durabilidade em concretos, optou-se, em função do tempo para realização do mesmo, pelo ensaio acelerado da reação álcali-agregado em barras de argamassa. Os ensaios demonstraram que como agregado miúdo, o reciclado de ágata, é potencialmente reativo para dois dos três cimentos estudados. Sendo assim, para representar uma boa alternativa no uso em concretos brancos e igualmente em concretas cinzas, e contribuir na diminuição do impacto ambiental causado pelos rejeitos, a ágata deve ser utilizada com adições, como a sílica ativa, utilizada neste estudo em duas porcentagens, capaz de mitigar a reação álcali-agregado.

Palavras-chave: Concretos com Resíduos. Resíduos de Ágata. Agregados Reciclados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama representativo do delineamento da pesquisa.....	20
Figura 2 – Mapa gemológico da região sul do Brasil (PR, SC e RS).....	22
Figura 3 – Geodos de formatos arredondados e ovoides de vários tamanhos.....	24
Figura 4 – Pedras roladas.....	25
Figura 5 – Rejeitos de ágata de uma empresa da região de Soledade-RS	25
Figura 6 – Chapas bandadas de ágata.....	26
Figura 7 – Ciudad de lãs Artes y de La Ciencia	30
Figura 8 – Vista do Museu Iberê Camargo.....	31
Figura 9 – Agregados de calcários utilizados em concretos.....	34
Figura 10 – Formas e parafusos protegidos.....	56
Figura 11 – Moldagem das barras.....	57
Figura 12 – Barra em medição no extensômetro.....	57
Figura 13 – Tanque de inox com as barras posicionadas em pé imersas em solução.....	58
Figura 14 – Grãos lamelares obtidos em britadores.....	59
Figura 15 – Britador de martelos.....	60
Figura 16 – Detalhe do sistema de peneiramento.....	61
Figura 17 – Separação granulométrica em bombonas.....	61
Figura 18 – Detalhe da mandíbula com ferros soldados.....	62
Figura 19 – Fotografia de fragmento de geodo analisado.....	65
Figura 20 – Área para análise microscópica.....	65
Figura 21 – Agregados fibrosos de quartzo.....	66
Figura 22 – Imagem do microscópio eletrônico.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características físicas das ágatas.....	28
Quadro 2 – Classificação de potencialidades.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Influência do teor de finos na expansão devido a RAA.....	44
Gráfico 2 – Difractometria de raios X da areia de britagem calcária.....	51
Gráfico 3 – Granulometria de areia de britagem calcária.....	52
Gráfico 4 – Granulometria do agregado reciclado de ágata.....	63
Gráfico 5 – Difractometria de raio X do agregado de ágata.....	63
Gráfico 6 – Comportamentos de diferentes reações em mesma solução alcalina do cimento ABCP + ágata e do cimento ABCP + calcário.....	67
Gráfico 7 – Combinação do CP V-ARI/RS + ÁGATA com e sem adições e o mesmo cimento com a areia do IPT com e sem adições.....	68
Gráfico 8 – Comparativo da combinação do CPB ora com areia do+ IPT, ora com reciclado de ágata.....	69
Gráfico 9 – Comparativo do CPB com areia do IPT e adições de sílica e CPB com ágata e adições de sílica.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compostos principais do cimento Portland branco.....	32
Tabela 2 – Exigências físicas e mecânicas para o cimento branco definidas na NBR 12989.....	33
Tabela 3 – Resistência à compressão de concretos moldados com cimento branco e cinza.....	36
Tabela 4 – Ensaio realizados com resíduos por vários pesquisadores.....	37
Tabela 5 – Caracterização física do cimento branco utilizado.....	46
Tabela 6 – Caracterização química do cimento branco utilizado.....	47
Tabela 7 – Caracterização mecânica do cimento branco utilizado.....	47
Tabela 8 – Caracterização física do cimento CP V-ARI/RS utilizado.....	48
Tabela 9 – Caracterização mecânica do cimento CP V-ARI/RS utilizado.....	48
Tabela 10 – Caracterização química do cimento CP V-ARI/RS utilizado.....	48
Tabela 11 – Caracterização física do cimento ABCP utilizado.....	49
Tabela 12 – Caracterização mecânica do cimento ABCP utilizado.....	49
Tabela 13 – Caracterização química do cimento ABCP utilizado.....	50
Tabela 14 – Porcentagens granulométricas de areia de britagem calcária.....	51
Tabela 15 – Combinações de agregados, cimentos e adições ensaiados.....	54
Tabela 16 – Granulometria de material para confecção das barras.....	56
Tabela 17 – Granulometria do agregado miúdo reciclado de ágata.....	62
Tabela 18 – Fluorescência de raios X.....	64

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

CPB – Cimento Portland branco

CP V-ARI/RS – Cimento Portland classe V de alta resistência inicial – resistente a sulfatos

CRA25 – Percentuais de agregado reciclado de ágata de 25%

CRA50 – Percentuais de agregado reciclado de ágata de 50%

CRA75 – Percentuais de agregado reciclado de ágata de 75%

Cientec – Fundação de Ciência e Tecnologia [Rio Grande do Sul]

EAF – Escória de alto forno

EGF – Escória granulada de fundição

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IRAM – *Instituto Argentino de Normalización y Certificación*

LAPROM – Laboratório de Processamento Minerais

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área (m²)

p = pressão (Pa)

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão (MPa)

a/c = relação água e cimento

μ = micro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.3 PRESSUPOSTO.....	19
2.4 HIPÓTESES	19
2.5 DELIMITAÇÕES	19
2.6 LIMITAÇÕES	19
2.7 DELINEAMENTO	20
3 ÁGATA	22
4 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO	29
4.1 APLICAÇÕES DO CONCRETO BRANCO	29
4.2 CONSTITUINTES DO CONCRETO BRANCO	31
4.2.1 Cimento Portland branco	31
4.2.2 Agregados	33
4.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO BRANCO.....	35
4.3.1 Resistência à compressão	35
4.3.2 Durabilidade	38
5 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	40
6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
6.1 MATERIAIS	45
6.1.1 Aglomerantes	46
6.1.1.1 Cimento Portland branco estrutural.....	46
6.1.1.2 Cimento Portland V de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos (CP V-ARI/RS)	47
6.1.1.3 Cimento padrão ABCP.....	49
6.1.2 Agregados	50
6.1.2.1 Areia de britagem calcária.....	50
6.1.2.2 Areia artificial de ágata reciclada.....	52
6.1.2,3 Areia padrão do Intituto de Pesquisas e Tecnologia.....	52
6.1.3 Adições	53
6.1.4 Água	53
6.2 MÉTODOS	53

6.2.1	Análise petrográfica do agregado reciclado de ágata.....	54
6.2.2	Ensaio acelerado das barras de argamassa.....	54
7	RESULTADOS.....	59
7,1	AREIA ARTIFICIAL DE ÁGATA RECICLADA.....	59
7.1.1	Análise petrográfica do residuo de ágata.....	64
7.1.2	Ensaio acelerado das barras de argamassa.....	67
8	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

No estado do Rio Grande do Sul, tem-se o terceiro maior polo do Brasil em beneficiamento de pedras preciosas, como a ágata, sendo que o processo produtivo, neste polo, gera resíduos que requerem solução quanto ao destino do material descartado.

Por este motivo, estudam-se alternativas que buscam solucionar um dos problemas enfrentados hoje pela indústria de pedras preciosas, que é o aproveitamento de rejeito gerado e a possibilidade de agregar valor econômico-social, de forma ambientalmente correta.

Na Construção Civil, a utilização destes e de outros resíduos apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e contribuição para o desenvolvimento sustentável. O aproveitamento de resíduos industriais como carga na produção de concretos pode resultar em muitos benefícios, talvez o principal sendo o alto consumo do resíduo e, podendo inclusive, vir a incrementar positivamente as propriedades mecânicas, além de possibilitar um destino sustentável a resíduos que, de outro modo, seriam dispostos em aterros industriais.

Uma alternativa para diminuição do problema foi proposta ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científica e Tecnológico (CNPq), através de um projeto de pesquisa, onde a moagem desses rejeitos seria para aplicação na indústria cerâmica, construção civil e impressão 3D de artefatos cerâmicos. Com a aceitação por parte do Conselho houve o início dos estudos. Na Construção civil, estes foram direcionados baseando-se em utilizar o resíduo como agregado em concretos, o que resultaria em um consumo grande do resíduo e uma diminuição de agregados extraídos da natureza para esse fim. Primeiramente constatou-se que o resíduo em questão, da rocha ágata, após a britagem, apresenta-se como um agregado miúdo de cor muito clara, o que sugeriu sua utilização em concretos de cimento Portland branco, hoje utilizados, na maioria das vezes, em obras estruturais, nas quais o concreto é aparente por motivos estéticos. Para a alternativa de uso exposta, constatou-se que os agregados reciclados de ágata, por se tratarem de um material ainda desconhecido na Construção Civil, necessitam de total caracterização quando da sua utilização em concretos.

Uma das principais dúvidas, que comprometeria o uso prolongado do resíduo, seria quanto ao comportamento dos minerais constituintes da rocha em contato com os componentes do cimento, podendo afetar sua durabilidade ao longo do tempo mesmo que viesse a apresentar, em menores idades, propriedades mecânicas melhoradas.

O presente trabalho faz parte de um projeto maior que pretende fundamentar a soma de esforços e a atuação conjunta em diversas áreas como Materiais Cerâmicos, Construção Civil, Mineralogia e Ciência da Computação, de forma integrada e multidisciplinar, na busca de soluções técnicas, econômicas e ambientalmente corretas na utilização do resíduo de ágata.

Isso exposto propõe-se estudar, primeiramente, a durabilidade de concretos brancos nos quais será feita a substituição do agregado miúdo calcário, utilizado na produção destes, por agregado miúdo reciclado de ágata, proveniente de depósitos de rejeitos.

Assim, este trabalho, será focado no comportamento dos resíduos reciclados de ágata com cimento, pela análise da reação álcali-agregado. Inicialmente será realizada uma verificação do processo a ser adotado para viabilizar o uso do resíduo como agregado e posteriormente sua caracterização que dentre outros ensaios inclui a análise petrográfica dando continuidade com o ensaio acelerado de barras de argamassa.

O presente trabalho está subdividido em oito capítulos. No primeiro capítulo, faz-se uma introdução sobre a importância da utilização de resíduos e o que tecnologicamente é preciso buscar para conhecer e incorporar o seu uso como um agregado convencional. O segundo capítulo, denominado método de pesquisa, apresenta a questão principal para a elaboração deste estudo. Além disso, destaca-se o objetivo principal do trabalho. Para que estes objetivos sejam atingidos com êxito, são estabelecidos pressupostos como ponto de partida, premissas utilizadas como base para o desenvolvimento do estudo, limitações previstas para este trabalho e o delineamento, contendo um diagrama, mostrando o inter-relacionamento das etapas do trabalho. O terceiro capítulo encerra a descrição do resíduo em si desde a formação da rocha, a sua extração, beneficiamento, perfil das empresas do ramo e o possível fechamento do ciclo produtivo. O quarto capítulo focaliza o concreto branco, suas características e seus constituintes convencionais.

A reação álcali agregado é apresentada no capítulo 5, neste tem-se os tipos de e reações causada pelos minerais componentes das rochas em contato com o cimento na presença de

umidade, explicações da sua ocorrência, consequências e formas de mitigação do processo na formação.

No capítulo 6 tem-se o programa experimental empregado, que permite conhecer os materiais empregados na pesquisa e os métodos de ensaio utilizados para atingir os objetivos propostos. No capítulo 7 apresenta-se a análise dos resultados e, finalmente, no capítulo 8, a conclusão do trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes para o seu desenvolvimento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A partir da discussão apresentada, verificou-se a existência de uma lacuna de conhecimento, expressa da seguinte forma: qual a influência da substituição de agregados miúdos convencionais por aqueles produzidos a partir de moagem de resíduos reciclados de ágata em um concreto de cimento Portland branco, quanto a sua durabilidade, diante da reação álcali-agregado?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é verificar a viabilidade do uso de resíduos do beneficiamento de ágatas provenientes de indústrias produtoras de pedras preciosas da região de Soledade – RS, como agregados miúdos, quanto à sua britagem e principalmente do ponto de vista da reação álcali-agregado.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa consistem em:

- a) verificação dos equipamentos adequados para a britagem dos resíduos de ágata frente a sua dureza superior à das rochas habitualmente empregadas como agregados nos concretos;

- b) avaliação da potencialidade reativa através do ensaio acelerado das barras de argamassa;
- c) análise da influencia da adição de sílica ativa como forma de mitigar a reação álcali-agregado.

2.3 PRESSUPOSTO

Para o desenvolvimento deste trabalho, admite-se a validade de:

- a) dados técnicos, previstos em manuais e normas elaboradas pelos órgãos competentes, relativos a uso de agregados em concretos;
- b) informações pertinentes ao processo evolutivo do uso de reciclados e concretos de Portland brancos, por pesquisadores e instituições de ensino e pesquisa competentes.

2.4 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a substituição de agregados convencionais por agregados miúdos reciclados, a partir de resíduos de ágata em concretos de cimento Portland branco, é viável do ponto de vista da durabilidade deste concreto frente à reação álcali-agregado.

2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se ao estudo da substituição, no concreto com cimento Portland branco, de agregados miúdos convencionais por agregados reciclados a partir de resíduos de ágata da indústria de beneficiamento da cidade de Soledade no estado do Rio Grande do Sul.

2.6 LIMITAÇÕES

Este trabalho será limitado ao desenvolvimento e estudo de:

- a) ensaio acelerado para avaliação da potencialidade reativa do agregado reciclado de ágata em barras de argamassa;
- b) utilização de três tipos de cimentos para os ensaios;
- c) acréscimo de sílica ativa como única adição e em apenas dois teores.

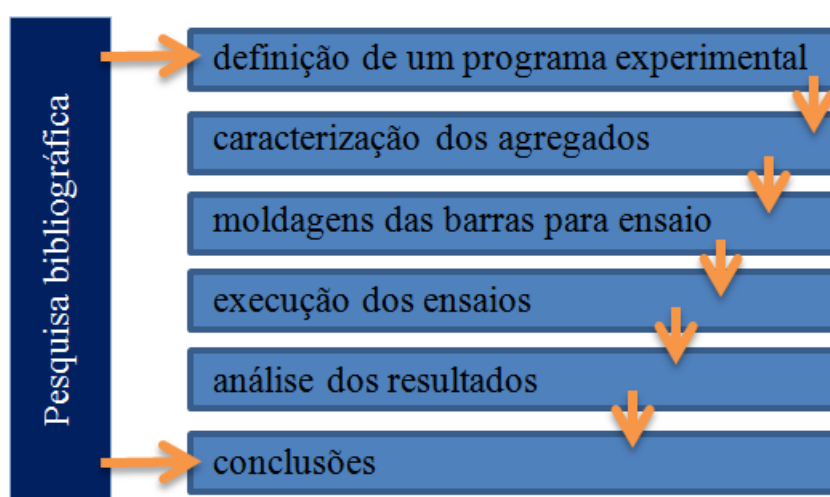
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição de programa experimental;
- c) caracterização dos agregados;
- c) moldagem das barras para ensaio;
- d) execução dos ensaios;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões.

As etapas acima referidas estão representadas na figura 1 e descritas nos parágrafos seguintes.

Figura 1 - Diagrama representativo do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A etapa de **pesquisa bibliográfica** é importante durante todo o desenvolvimento do trabalho para a aquisição de conhecimentos já desenvolvidos com o cimento Portland branco no uso de concretos com determinados agregados e os resultados de suas características mecânicas e de durabilidade. Com o conhecimento adquirido na pesquisa será possível definir um **programa experimental** que se adeque com os materiais a serem ensaiados no estudo.

Para constituir fatores restritivos ou benéficos ao uso da ágata, será realizada a **caracterização dos agregados** através de análise petrográfica, que permite a definição mineralógica, composição modal e natureza da rocha, pois são esses fatores que podem

resultar em alterações secundárias e microfissuramentos, que têm reflexos imediatos na resistência mecânica e química, e conseqüentemente na durabilidade.

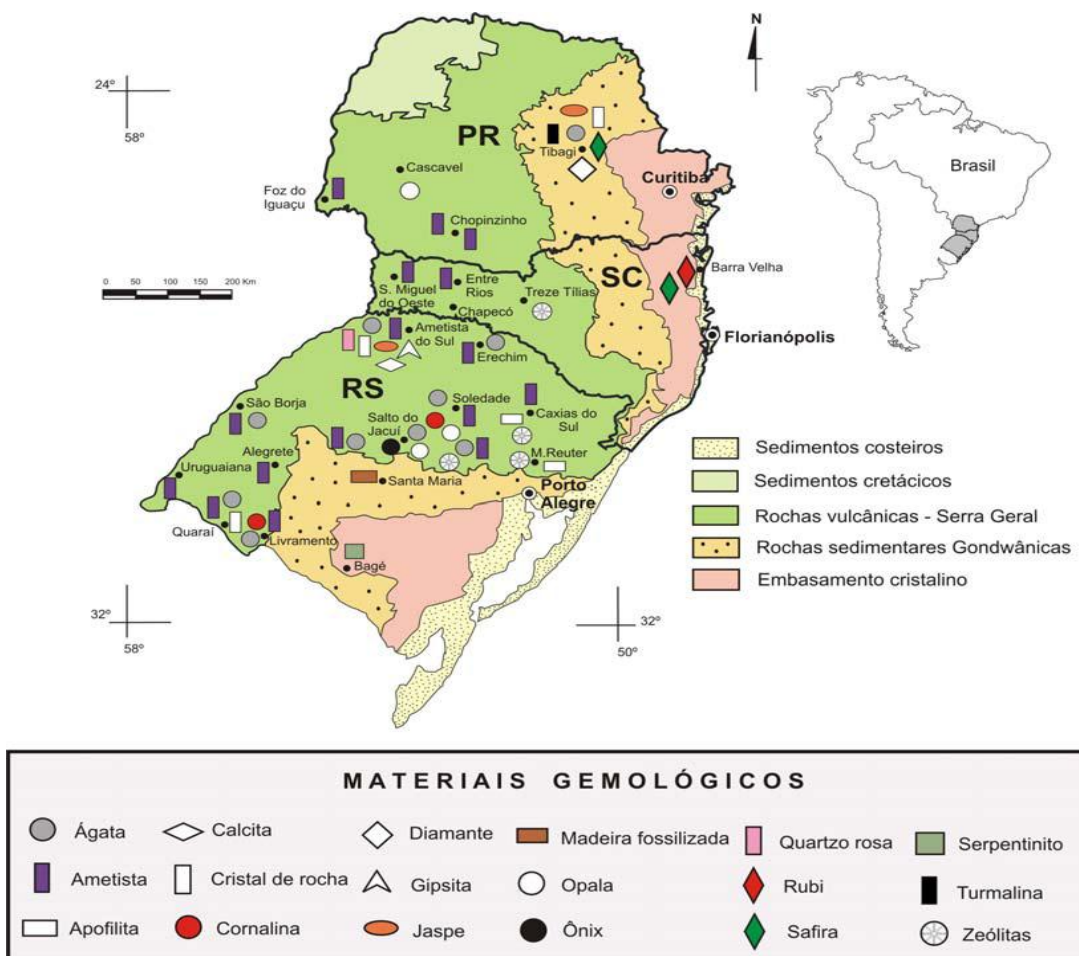
A etapa de **moldagem das barras para ensaio** terá por finalidade simular a reação, entre os componentes da matriz elaborada no programa experimental, quando forem colocadas em solução de hidróxido de sódio conforme NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c). A seguir houve a **execução dos ensaios** acelerados da reação álcali-agregado com duração de 30 dias a contar da confecção de cada barra, 28 dos quais em imersão em hidróxido de sódio. Para a **análise dos resultados**, as barras moldadas continham as seguintes informações: constituintes, número de identificação; data de moldagem; idade e data do ensaio, a partir disso serão feitas as comparações dos resultados obtidos, verificando os comportamentos apresentados pelas diferentes combinações.

As **conclusões** abordam as considerações finais e se não for constatada influência significativa da substituição de agregados convencionais por reciclados, a partir da análise, poderá ser definida uma continuação mais detalhada de ensaios de caracterização destes materiais como sugestão para trabalhos futuros.

3 ÁGATA

O Brasil é uma das nove regiões geográficas com excepcional volume na produção de gemas e está classificado como o maior produtor de ágata do tipo Umbu, por exemplo. O Rio Grande do Sul não se destaca pela variedade, mas é importante pela quantidade que produz, e ocupa o terceiro lugar no Brasil, após Minas Gerais e Bahia (BRANCO; VIEIRO, 2004). No mapa da figura 2 estão indicadas as principais unidades geológicas e as áreas de ocorrência de materiais de interesse gemológico. Os principais locais da extração de geodos encontram-se na zona central do Rio Grande do Sul, no chamado Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ).

Figura 2 – Mapa gemológico da região sul do Brasil (PR, SC e RS)



(fonte: JUCHEM et al., 2009)

As ágatas, que serão utilizadas neste trabalho, foram coletadas na cidade de Soledade, por ser este lugar, referência tecnológica para o estado e por sediar o Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul, criado em 2005. A cidade é reconhecida por lei, como Capital das Pedras Preciosas, por possuir um alto número de empresas que atuam no processo produtivo, desde a produção até a comercialização de gemas e artefatos oriundos das pedras. Sendo assim, Soledade caracteriza-se por possuir procedimentos completos de transformação industrial de geodos e pedras brutas em peças acabadas, tem-se como consequência a geração de uma elevada quantidade de rejeitos da produção.

Segundo Betat (2006), o estado do Rio Grande do Sul, no beneficiamento, dentro do processo produtivo de pedras preciosas, como a ágata, gera resíduos que demandam um direcionamento para o passivo acumulado no processo, que hoje é depositado nos pátios das empresas. Na construção civil, vislumbra-se um caminho para a utilização destes resíduos que, como consequência, traria uma diminuição do impacto ambiental e a contribuição para o desenvolvimento sustentável. Assim este contexto mostra que, é prioridade a redução da quantidade de resíduos, iniciando-se pela fase de extração e passando por todos os processos de beneficiamento, pois eles sempre serão gerados. O desenvolvimento sustentável requer a redução do consumo de matérias primas naturais não renováveis e umas das saídas para isso está se houver um fechamento do ciclo produtivo, com o consumo do resíduo gerado, a partir da reciclagem do mesmo.

O Estado concentra uma das principais produções de ágata Umbu, que se apresenta de cor acinzentada e com bandeamento fraco ou imperceptível. A localização no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ) ocorre às margens dos rios Jacuí e Ivaí e são reuniões de diques de arenito Botucatu. Junto a estes diques, o teor e a qualidade dos geodos de ágata são pequenos, enquanto que distante dos diques, tanto o teor, quanto a qualidade dos geodos de ágata são maiores (HEEMANN¹, 2005 apud STRIEDER, 2005).

No DMSJ, a ágata ocorre em aproximadamente duzentas frentes de lavras, sua extração se dá pela retiradas de geodos que ocorrem em cavidades nas rochas vulcânicas basálticas já muito alteradas. Extraídos na maioria das vezes em depósitos a céu aberto, os geodos apresentam

¹ HEEMANN, R.. **Modelagem exploratória estrutural e tridimensional dos depósitos de ágata do distrito Mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

formatos de arredondados a ovoides tendo de 10 a 50 cm de diâmetro (figura 3), podendo haver a ocorrência de maiores tamanhos, preenchidos geralmente, em sua totalidade por ágata, podendo ainda apresentar, em alguns casos, água em seu interior (JUCHEM et al., 2009).

Figura 3 – Geodos de formatos arredondados e ovoides de vários tamanhos



(fonte: foto do autor)

Conforme Ipar (2010), o processo do beneficiamento inicia-se com a serragem das chapas de ágata, portanto, a maior parte dos rejeitos gerada nos processos é ainda a ágata sem nenhum tratamento. Depois de serem serradas, são levadas para o Setor de Tingimento no qual recebem tratamento com diferentes produtos químicos, calor, pressão, etc., pois para cada cor desejada, utiliza-se um processo diferente. São selecionadas para tal apenas as peças que possuem boa qualidade (inteiras e sem trincas), as restantes são descartadas no processo. Do tingimento geralmente não restam resíduos sólidos, como peças quebradas ou trincadas, o resíduo continuará a ser gerado após o tingimento, na face de furação, polimento e algum outro processo mecânico necessário para produzir as peças. Ainda segundo esse autor, a cidade de Soledade possui grande quantidade de rejeitos vendidos, em forma ainda de geodos, são usados para a produção de pedras roladas (figura 4) resultando com uma massa média final de 30g a unidade e medindo de 1 a 7 cm, que segundo as informações colhidas, isto representando apenas um aproveitamento de cerca de 15%. Os resíduos não vendidos ficam ali depositados, armazenados no pátio da empresa como observado na figura 5.

Figura 4 – Pedras roladas



(fonte: foto do autor)

Figura 5 – Rejeitos de ágata de uma empresa da região de Soledade-RS



(fonte: IPAR, 2010)

Branco e Vieiro (2004) afirmam que há muita exportação de peças para decoração, jóias e presentes, mas que ainda o Brasil manda para fora muita matéria bruta. São riquezas naturais processadas fora do País, agregando pouco valor às exportações, gerando menos empregos e renda. A substituição desta crescente exportação de riquezas em bruto, por produtos beneficiados com maior valor agregado, pode representar uma menor agressão ao meio ambiente e conservação das riquezas naturais.

As ágatas possuem visivelmente bandas paralelas, às vezes marcadas muito suavemente, denotando um aspecto de uniformidade sutil. Tais minerais são conhecidos como ágata unida ou ágata listrada. Isso se explica porque as maiorias das ágatas ocorrem como nódulos em rochas eruptivas, ou antigas lavas, onde preenchem as cavidades produzidas originalmente pela desagregação do vapor na massa derretida, e então preenchido, completamente ou parcialmente, pela matéria silicosa depositada em camadas regulares em cima das paredes. Na figura 6, têm-se bem claras as bandas, ou listras, das ágatas, no exemplo da figura são ágatas na sua maioria tingidas de azul, vermelho e verde em uma porcentagem de aproximadamente 40% do total produzido.

Figura 6 – Chapas bandadas de ágata



(fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS, 2009)

No Brasil ainda se está com os processos de beneficiamento bastante atrasados, geralmente quase artesanais e sem nenhuma ou com baixíssima automação. Há ainda uma forte presença de empresas pequenas sem condições de investimentos em equipamentos para beneficiamento. O mercado da região está se organizando e crescendo a cada ano. Segundo Costa (2007, p. 9):

[...] o setor ainda é pobre em estudos e trabalhos que objetivam aprimorar os seus processos e, portanto, há necessidade de melhorias nestes investimentos em tecnologia para obter produtos finais padronizados e de maior qualidade, reduzir as perdas e aumentar a produtividade. Muitas técnicas e ferramentas já utilizadas por empresas dos mais diversos setores podem ser implantadas nas empresas do setor de pedras preciosas do estado do Rio Grande do Sul e dar a estas, maior poder de

competição no mercado global, aproveitando a matéria-prima próxima e ainda abundante.

Há muitos anos se formavam pequenas fábricas de beneficiamento de pedras, oriundas da vocação dos imigrantes alemães que dominavam as técnicas de extração e beneficiamento de gemas, consolidando-se com força em meados de 1970 na cidade de Soledade, por estar mais próxima das regiões onde as gemas são extraídas. Com o passar dos anos houve a multiplicação das empresas, sendo hoje aproximadamente em número de 180. Possuindo estruturas de micro e pequenas empresas, com forte classificação familiar, não possuem elevados recursos financeiros, o que inibe uma formação profissional e técnica mais avançada. Como resultado tem-se um aprendizado, muitas vezes, de pai para filho, sem se tomar o cuidado de absorver novas tecnologias que possibilitem melhor aproveitamento da matéria prima e diminuição do impacto ambiental.

O impacto causado ao meio ambiente está sendo fiscalizado por operações conjuntas do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), Receita Federal, Ministério do Trabalho e Companhia Ambiental da Brigada Militar resultando em autuações e até a interdição de algumas mineradoras e pequenas empresas que atuam no beneficiamento da pedra ágata. As empresas receberam prazos para sua adequação, obrigando-se a procurar novas saídas para os resíduos. Mesmo tendo o conhecimento das etapas do processo nos quais são gerados os resíduos, as empresas não vislumbram como dar um destino adequado, nem a possibilidade de reaproveitamento como geração de fonte de renda. Uma das saídas propostas é a utilização desses resíduos na construção civil, incorporando-os ao concreto, porém deve ser analisada a existência de boa qualidade e desempenho compatível. O Manual Técnico de Gemas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS, 2009, p. 16) especifica que as gemas são identificadas por meio dos valores de suas características físicas, medidas por intermédio de ensaios realizados em laboratórios gemológicos, utilizando-se de normas técnicas nacionais e internacionais. Estes ensaios revelam a presença de quartzo, dióxido de silício (SiO_2), aparecendo na natureza somente sob a forma de compostos, sendo que o silício é, depois do oxigênio, o elemento mais abundante da crosta terrestre. A ágata apresenta-se em agregados maciços e bandados. É um material translúcido, fosco a resinoso e que adquire brilho vítreo quando polido. É constituída por microcristais de quartzo em agregados granulares ou microcristais fibrosos que podem se dispor em agregados paralelos, radiados ou esferulíticos, contendo água em

poros submicroscópicos. A seguir no quadro 1 são apresentadas as características das ágatas comumente encontradas e comercializadas.

Quadro 1 – Características físicas das ágatas

Classe mineral	silicatos
Espécie mineral	quartzo criptocristalino
Sistema de cristalização	hexagonal (trigonal)
Fórmula química	SiO ₂
Variedade	calcedônia
Nomes utilizados pelo mercado	muitos, sendo que alguns têm significado apenas local; ágata, ágata musgo, ágata iridescente e ágata-de-fogo
Cor	várias, usualmente cinza azulada, branca, marrom e vermelha; apresenta estrutura bandada, com camadas de cor, espessura e porosidade
Transparência	de semitransparente a opaca
Brilho	de gorduroso a vítreo
Fenômenos ópticos	pode apresentar iridescência (capacidade de refletir as cores do arco-iris)
Índices de refração	1,535 - 1,539
Caráter óptico	AGG (reação de agregados)
Birrefringência	normalmente indetectável, porém pode apresentar 0,004
Fluorescência	geralmente inerte; algumas podem fluorescer de fraco a forte verde amarelado (uvc e uvl)
Espectro de absorção	não apresenta espectro significativo; verde tingida - linhas oscilantes em torno de 645 e 670 nm
Peso específico	Peso específico 2,60 (+0,10, -0,05)
Fratura	concoidal algumas vezes granulada de brilho fosco a ceráceo
Características de identificação	inclusões minerais (limonita, goethita, pirolusita e hornblenda) frequentemente tingida de várias cores, devido a sua grande porosidade,
Tratamentos possíveis	principalmente com corantes metálicos, mais estáveis; verde (sais de cromo), vermelho (óxido de ferro; também tratamento térmico para intensificar a cor), preto (açúcar e ácido sulfúrico), azul (ferro cianeto de potássio e sulfato de ferro)
Dureza	6,5 - 7
Estabilidade ao calor	pode mudar a cor
Estabilidade à luz do dia	estável
Estabilidade a reações químicas	atacado por ácido fluorídrico; ácido nítrico pode atacar o tingimento

(fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS, 2009)

4 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO

O cimento Portland branco, principal componente do concreto branco, teve sua origem e produção devido à necessidade de um cimento para fins especiais, que proporcionasse mais beleza e opções de cores ao concreto. Na década de 1950, entra em operação o primeiro forno de cimento branco no Brasil, sendo então, posteriormente, distribuído ao mercado.

Nos dias de hoje, o concreto de cimento Portland branco já tem seu uso bem disseminado em grandes obras pela Europa e em países como Estados Unidos e Colômbia. Sendo que, no mercado da construção civil brasileira, têm-se obras de porte, porém ainda há carência de um maior conhecimento de suas características (KIRCHHEIM et al., 2004, p. 1). Mas, os avanços tecnológicos do concreto fazem surgir um maior índice de exigências de desempenho, tais como estética, durabilidade ao longo do tempo, cromaticidade, dentre outras (KIRCHHEIM et al., 2005, p. 1453). Os autores indicam ainda que muita atenção deve ser dada quando um material muito novo ou modificado for inserido no mercado, necessitando que seu comportamento seja estudado para verificar suas propriedades e desempenho, em diferentes momentos de suas aplicações. Torna-se prioridade, então, desenvolver e difundir nacionalmente, tecnologias para produção e conhecimento deste tipo de material. A experiência brasileira iniciou com a aplicação em vários setores como a seguir descritos.

4.1 APLICAÇÕES DO CONCRETO BRANCO

A utilização do concreto branco oferece novas possibilidades no contexto de Arquitetura e Engenharia em obras civis, valorizando seu aspecto estético. Uma das utilizações deste material está na produção de peças pré-fabricadas, principalmente pisos intertravados de concreto colorido, já que o concreto branco para este fim permite a variação de cores. Diversas praças, estacionamentos e pátios de escolas utilizam esse material. Grandes obras de Arquitetura e Engenharia podem ser listadas para referir-se ao uso do concreto de cimento Portland branco, sendo que essas estão localizadas, em sua maioria, na Europa.

Kirchheim et al. (2005, p. 1456) afirmam que arquitetos de renome como Santiago Calatrava e Richard Meyer empregam o concreto branco devido à sua cromaticidade, utilizando-o como

elemento estético. Segundo os autores, em Portugal, desenvolve-se um grande número de obras com concreto branco, graças ao ilustre arquiteto Álvaro Siza, que afirma fazer uso do concreto, por tratar-se de um material que dispensa revestimentos, possui impacto positivo quanto à durabilidade e ainda pode contar com a satisfação do requisito estético. Pode-se citar, como exemplo de obras desta natureza, a construção do conjunto da *Ciudad de las Artes y la Ciencia*, um dos maiores complexos de divulgação científica e cultural da Europa, localizado em Valencia, na Espanha. Na figura 7, estão apresentados três das construções que compõem o complexo.

Figura 7 – Vista do Hêmiféric com o Palau Reina Sofía e do Museu de las Ciencias



(fonte: CIUDAD DE LAS ARTES Y LA CIENCIA, 2012)²

No Brasil, hoje já se conta com algumas obras de grande porte executadas em concreto branco, entre elas a Ponte Irineu Bornhausen, em Brusque, e o Museu Iberê Camargo em Porto Alegre (figura 8).

O Museu Iberê Camargo é um marco no estudo de caso, por ter fornecido grande parte dos dados disponíveis na atualidade sobre este tipo de material, visto que a Universidade Federal do Rio Grande do Sul participou do desenvolvimento e implementação deste tipo de concreto na obra.

² Parte integrante do acervo fotográfico da Ciudad de las Artes y la Ciencia.

Figura 8 – Vista do Museu Iberê Camargo



(fonte: FUNDAÇÃO IBERÊ CAMARGO, 2008)³

4.2 CONSTITUINTES DO CONCRETO BRANCO

As obras com concreto branco são exuberantes, com uma aparência superficial branca, que lhe atribui leveza e modernidade. Para atingir esta brancura aparente são levados em conta, não somente os critérios de fabricação do cimento branco, mas também alguns fatores durante o processo executivo, que deverá ter um controle rigoroso para evitar a diferenciação na cor. No entanto, estes fatores não serão discutidos, pois não é o foco deste trabalho.

A seguir é apresentado um breve resumo dos constituintes do concreto de cimento Portland branco. Inicialmente apresenta-se o cimento de Portland branco e, a seguir, os agregados mais usuais.

4.2.1 Cimento Portland branco

O cimento Portland branco se diferencia dos demais pela coloração e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em concretos brancos com classes de resistência 25, 32 e 40 MPa, similares às dos demais tipos de cimento. Já o não estrutural não tem indicações de classe e é aplicado, por exemplo, como rejunte de azulejos (KIRCHHEIM et al., 2005, p. 1463).

³ Foto que o diretor da Construtora Camargo Corrêa, Elias Herrmann, tirou do prédio da Fundação Iberê Camargo em visita à construção na data de 09/05/2008.

Este tipo de cimento pode ser utilizado nas mesmas aplicações do cimento cinza. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais de fabricação, tais como controle de resfriamento e moagem do produto e, principalmente, com a utilização de caulim no lugar da argila, para atingir um índice de brancura maior que 78%. Para não haver intervenção na coloração final é utilizado no moinho, bolas especiais, de cerâmica, níquel ou molibdênio, podendo também ser empregadas bolas revestidas ou seixos. Outro detalhe é a utilização de óleo ou gás como combustível de queima. Essas medidas de fabricação fazem elevar, em quase o dobro, o custo do cimento branco, em comparação ao do cinza. Em mercados internacionais essa relação pode até triplicar. Se ainda, houver a necessidade de adicionar ao cimento um elemento químico capaz de impedir a fixação de partículas e fungos na superfície do concreto executado, o valor chega a ser doze vezes maior que o valor do cimento cinza (NEVILLE, 1997).

O CPB (cimentos Portland branco), em relação às características químicas, possuem basicamente os mesmos compostos que o cimento cinza, isto pode ser conferido na tabela 1. A tabela mostra que os cimentos brancos têm teores baixos de C_4AF (ferroaluminato tetracálcico), em relação aos cinzas que variam de 2 a 3,5% na sua composição, compensando com um aumento de C_3A (aluminato tricálcico) e, ainda dependendo da composição da rocha, que constitui a formação do clínquer, pode haver alguns outros compostos em menores proporções, como óxidos de sódio e potássio, de manganês e magnésio, além de fósforos fluoretos e sulfatos ou ainda, óxido de cálcio livres (KIRCHHEIM et al., 2005, p. 1464).

Tabela 1 – Compostos principais do cimento Portland branco

Compostos	Compostos c/ óxidos	Abreviaturas	Teores em % CPB
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	50 - 70
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S	15 - 13
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	4 - 13
Ferro Aluminato tetracálcico	Fe_2O_3	C_4AF	-1

(fonte: LEA⁴, 1970 apud KIRCHHEIM, 2003; NEVILLE, 1997; TAYLOR⁵, 1992 apud KIRCHHEIM, 2003)

As principais características físicas do cimento Portland branco são a finura e o tempo de pega. Conforme a NBR 12989 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,

⁴ LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**, New York: Longmans, Green; London: E. Arnold, 1970.

⁵ TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Thomas Telford, 1992.

1993, p. 3), tendo em vista que a brancura do material tende a aumentar com a finura do mesmo, os cimentos brancos são, em geral, moídos muito finamente, o que resulta em uma maior superfície específica para hidratação em presença de água, isto implica diretamente no ganho de resistência com o tempo. As exigências da Norma podem ser apreciadas na tabela 2.

Tabela 2 – Exigências físicas e mecânicas para o cimento branco definidas na NBR 12989

Características e propriedades	Tempo de ensaio	Unidades	Limites			
			CPB-25	CPB-32	CPB-40	CPB
Resíduo na peneira 45µm	-	%	-	≤12	-	≤12
Tempo de início de pega	-	H	-	≥ 1	-	≥ 1
Expansibilidade a quente	-	mm	-	≤ 5	-	≤ 5
Resistencia a compressão	3 dias	MPa	≥ 8,0 ≥ 10,0 ≥ 15,0			≥ 5
	7 dias		≥ 15,0 ≥ 20,0 ≥ 25,0			≥ 7
	28 dias		≥ 25,0 ≥ 32,0 ≥ 40,0			≥ 10
Brancura	-	%	-	≥ 78	-	≥ 82

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 3)

Kirchheim et al. (2005, p. 1465) afirmam que, desta forma, os concretos brancos reagem levados pelas características dos cimentos brancos, apresentando assim, tempos mais curtos para início de pega. Desta forma, a concretagem de elementos estruturais de grandes dimensões, necessita de um controle muito mais rigoroso na sua execução, porque desenvolverão elevado calor de hidratação já em primeiras idades.

4.2.2 Agregados

Rochas britadas artificialmente como o calcário, o basalto, o granito ou o mármore, na maioria das vezes, são possíveis de usar como agregados dos concretos brancos. Agregados naturais como a areia de rio também é uma alternativa. A escolha destes agregados é determinada pelos efeitos estéticos pretendidos classificando-os quanto à cor e à textura. Assim, a opção por agregados mais claros, acaba tornando mais fácil o controle da aparência superficial. Em virtude dos agregados constituírem mais da metade da composição do concreto, é correto afirmar que eles ajudam a caracterizá-lo. Conforme Kirchheim et al. (2005, p. 1466), a natureza e a granulometria do agregado são os dois itens que mais afetam o concreto, principalmente quando o concreto é branco, pois incidem diretamente na cor.

Dependendo do efeito estético pretendido, deverá se optar por um agregado específico. Assim, a escolha por agregados com cores claras será sempre a melhor opção para manter a brancura no concreto.

Passuelo (2004) realizou ensaios de laboratório, com o objetivo de avaliar a questão cromática dos concretos à base de cimento branco. No programa experimental, foi composta uma matriz com um tipo de cimento Portland branco estrutural, dois tipos de agregados graúdos (basalto e calcário) e dois tipos de agregados miúdos (areia natural de quartzo e areia artificial de calcário). Em ensaio, através de espectrofotometria, verificou-se uma resposta bastante satisfatória no uso dos agregados citados, já que os parâmetros medidos conseguiram representar os efeitos que os materiais constituintes produzem na cor final das superfícies de concreto. Os resultados obtidos indicam que, os agregados de calcário com elevada finura e brancura, são de fundamental importância na produção de concretos brancos.

Na figura 9, são apresentados agregados de calcário com várias granulometrias, comercialmente vendidas. O calcário é uma rocha classificada como sedimentar, podendo por isso ser encontrada em forma de calcário puro, formando o mineral calcita, até na forma de dolomito puro, normalmente classificado como dolomita (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 243).

Figura 9 – Agregados de calcários utilizados em concretos



(fonte: KIRCHHEIM et al., 2005, p. 1466)

Segundo Neville (1997, p. 130), a rocha-mãe do agregado é responsável pela composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física, estrutura de poros e cor. Já outras características, como forma e tamanho de partículas, textura superficial e absorção, não estão relacionadas à rocha de

origem, e sim a outros processos e condições as quais o material foi exposto ou submetido durante sua trajetória até a obra.

A partir disso, verifica-se a necessidade de um controle rigoroso no uso de agregados, principalmente na escolha do agregado miúdo, cuidando sempre com a variação do teor de finos ou mesmo, para a existência de contaminação por argilas ou outro material pulverulento. Já os agregados graúdos não influenciam diretamente na cor, porém a tonalidade do agregado pode provocar sombreamentos na superfície clara do concreto e, em caso de quebra em quinas ou deterioração da camada superficial, o que poderá vir a interferir na estética do conjunto (KIRCHHEIM et al., 2005, p. 1469).

Durante a moagem, o resíduo de ágata se mostrou claro e com características próximas ao agregado calcário, no entanto não foi realizado até o momento nenhum tipo de caracterização deste resíduo com vistas a serem utilizados em concretos, estando aí uma das lacunas de conhecimento deste trabalho.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO BRANCO

O crescimento do uso de cimento Portland branco em concretos exige um conhecimento de todos os compostos utilizados no processo, para isto as propriedades em cada caso devem ser estudadas e bem definidas.

4.3.1 Resistência à compressão

Utilizada como indicador na qualidade do concreto, a resistência à compressão é a propriedade com maior referência em pesquisas na área. Kirchheim et al. (2005, p. 1472) afirmam que em diversas pesquisas já realizadas, o cimento Portland branco, utilizado sob as mesmas condições de dosagem, confere resistência semelhante ou, em alguns casos, superior se comparado aos resultados com cimento cinza.

Esta conclusão é reforçada por Benitez et al. (2002, p. 2) quando afirmam que realizaram estudos com um cimento branco e um cinza (correspondente em termos de composição ao CPV-ARI), em dosagem para concretos convencionais, fixando o consumo de cimento dos concretos em 330 ± 3 kg/m³ e abatimento em 10 ± 1 cm, juntamente com a utilização do aditivo

plastificante retardador de pega. Os valores encontrados para resistência à compressão podem ser visualizados na tabela 3.

Tabela 3 – Resistência à compressão de concretos moldados com cimento branco e cinza

Resistência a compressão (em MPa)	Idades	Norma IRAM	Concreto com cimento branco		Concreto com cimento cinza	
			Padrão	com aditivo	Padrão	com aditivo
	7 dias	1546	32,4 ± 0,8	35,5 ± 1,3	26,8 ± 1,0	34,7 ± 1,4
	28 dias		35,6 ± 1,2	48,1 ± 1,7	31,7 ± 1,6	38,0 ± 1,2

(fonte: BENITEZ et al., 2002, p. 2, tn)

Observa-se que os autores encontraram valores de resistências à compressão, aos sete dias, 20% maiores para os concretos moldados com cimento branco que com o cinza. Nos concretos com aditivos, a resistência à compressão dos concretos brancos foi 35% maior. Já as resistências com os concretos cinzas foram 10% maiores na idade de 28 dias, quando comparados ao de referência.

Na tabela 4, são apresentados os trabalhos de várias pesquisas que utilizaram o cimento branco ou cinza, variando o tipo de agregado graúdo e miúdo e em alguns casos estudos com a adição de resíduos das mais distintas origens, na constituição de concretos.

Estes resultados são interessantes na comparação de fatores que influem na resistência final de concretos. Os resultados demonstram que o tipo de agregado, cimento e a possível utilização de adição mineral, interferem na resistência mecânica dos concretos. Portanto, sempre que for definida a utilização de resíduos ou novos materiais em concretos, estes devem ser caracterizados antes do seu uso ser liberado.

Tabela 4 – Ensaio realizados com resíduos por vários pesquisadores

PESQUISADOR REFERENCIADO	DATA	CIMENTO		a/c	AGREGADOS			OBS	RESULTADO DE ENSAIOS												Slump (mm)
		Cinza	Branco		Miúdo fina/média	Graúdo B0	Outros		Resistência à compressão, f_{ck} (Mpa)												
									7 dias				14 dias				28 dias				
									CPB1	CPB2	CPB3	CPB4	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4	CPB1	CPB2	CPB3	CPB4	
KIRCHHEIM	2003	-	CPB	0,4 0,5 0,6	areia média quartzosa	basalto		CPB1 30,61 22,27 14,92	CPB2 33,04 23,14 14,83	CPB3 35,46 23,94 16,34	CPB4 34,07 19,89 14,06	CPB1 37,08 29,46 22,50	CPB2 41,52 29,51 23,34	CPB3 42,84 32,89 23,94	CPB4 45,59 29,13 21,30	CPB1 37,97 32,40 24,29	CPB2 45,87 32,31 24,44	CPB3 45,31 33,25 26,52	CPB4 45,22 33,20 23,96	70±10	
		CPV-ARI	-	0,4 0,5 0,6	areia média quartzosa	basalto		38,57 26,93 18,99				41,12 33,76 26,04				43,45 33,84 27,16					
PAGNUSSAT	2004	CPV-ARI	-	0,45 a 0,65	calc./quart	granítica	EGF	Porcentagem de substituição	10% 24,92	30% 16,15	50% 13,68	10% 27,53	30% 17,2	50% 13,46	10% 28,23	30% 20,38	50% 15,16			225±5	
SIQUEIRA	2008		CPB	0,3	quartzosa	diabásica	EAF	Nomenclatura própria	50E 48,2	70E 46,3	50A 50,1	- -	- -	- -	50E 57,1	70E 57,3	50A 60,3			90±10	
PIOVESAN	2009	-	CPB	0,4 0,55 0,7	calcária	calcária	Pigmentos	VERMELHO	3% verm. 50,98	6% verm. 50,84	10% verm. 49,91	3% verm. 55,92	6% verm. 51,63	10% verm. 51,74	3% verm. 55,25	6% verm. 56,24	10% verm. 59,02			200±20	
				0,4 0,55 0,7	calcária	calcária	Pigmentos	VERDE	3% verd. 50,82	6% verd. 48,26	10% verd. 52,02	3% verd. 52,90	6% verd. 52,87	10% verd. 53,80	3% verd. 57,10	6% verd. 56,05	10% verd. 58,00	3% verd. 41,78	6% verd. 39,95		10% verd. 39,99
GIGUER	2009	-	CPB	0,4 0,5 0,6	filler calcário e conv. calcária	calcária	Tinta em pó base epoxiflica	Tinta em substituição de filler	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- 30,00 25,00 18,00	50% 20,00 18,00	100% 20,00 17,00			200±20	
CORDEIRO	2009	CNP-40	-		areia quartzosa	basalto	Casca de arroz					CCA ₅₀₀ 31,51	CCA ₆₅₀ 24,72	CCA ₈₀₀ 26,05	CCA ₉₅₀ 24,19	CCA ₁₁₀₀ 20,62			225±5		
BETAT et al.	2009	CP IV 32	-	0,43 a 0,71	areia quartzosa	basalto	Resíduos de ágata						traços	1:3,5 1:5,0 1:6,5	CRA25 32,10 24,30	CRA50 38,80 31,40	CRA75 33,10 28,40			100±10	

* Unidade (g/cm² *h^{1/2})

(fonte: BETAT, 2006; CORDEIRO, 2009; GIGUER, 2009; KIRCHHEIM, 2003; PAGNUSSAT, 2004; PIOVESAN, 2009; SIQUEIRA, 2008)

4.3.2 Durabilidade

Mesmo sendo um material sólido e robusto, o concreto sofre ações deletérias ao longo do tempo, ocasionando assim, sua degradação. A durabilidade vai depender da maneira que foi elaborado e da agressividade do meio onde ele se encontra, assim tornam-se importantes a correta indicação do tipo de cimento usado e dos agregados ou adições que o constituam, as inspeções e as manutenções desde a fase de projeto até o produto final, prosseguindo com o acompanhamento ao longo da sua vida útil.

Um fator que ajuda no aumento da durabilidade do concreto é o revestimento que ele possua. Concretos aparentes carecem de maiores cuidados, já que sua estrutura, sem revestimento, ficará exposta a ações do ambiente a qual está inserido.

Assim, conforme Neville (1997) uma estrutura de concreto é considerado durável quando desempenha todas as atribuições que lhe foram atribuídas, mantendo sua resistência e utilidade, para isso o concreto deverá suportar ao processo de deterioração ao qual foi projetado.

O mesmo autor relata que a durabilidade inadequada do material concreto, branco ou cinza, pode se dar tanto por um dano provocado por agentes externos quanto por fatores inerentes ao próprio concreto, sendo que as formas de ação conhecidas são físicas, químicas e mecânicas. Dentre as causas de deterioração mecânica destacam-se impacto, abrasão, erosão ou cavitação. As causas químicas de deterioração podem incluir as reações álcali-sílica e álcali-carbonato, internamente, e a ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono e muitos líquidos e gases naturais e industriais. Já as causas físicas compreendem os efeitos de altas temperaturas ou de diferenças de coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratado. Com tantos fatores torna-se difícil atribuir o problema de durabilidade a um fator isoladamente, visto que os diversos processos de deterioração podem atuar simultaneamente.

Segundo Metha e Monteiro (2008) as causas químicas e físicas estão intimamente relacionadas, fazendo com que frequentemente seja impossível separar a causa e o efeito da manifestação patológica. Estes pesquisadores agrupam as causas físicas em duas categorias, a primeira seria o desgaste superficial ou a perda de massa devido à abrasão, erosão ou cavitação, e a segunda é a fissuração devida a gradientes normais de temperatura e umidade, pressões causadas por

cristalização de sais nos poros, carregamentos estruturais e exposição a extremos de temperatura tais como congelamento e fogo. Consideram que as químicas se desencadeiam a partir de uma substância nociva penetrando pelos poros ou sendo incorporada com a mistura dos materiais constituintes do concreto. Assim como as causas físicas, as químicas também são separadas em categorias. A hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura, trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento e as reações causadoras de produtos expansivos (expansões por sulfatos, reações álcali-agregado, e corrosão de armaduras nos concretos).

Corroborando com a ideia acima, Techer (2006) afirma que um dos fenômenos físico-químico que afeta a durabilidade dos concretos é a reação álcali-agregado. A autora relata que se trata de uma reação lenta que ocorre entre os íons alcalinos, normalmente provenientes do cimento e alguns minerais reativos, presentes nos agregados, esta reação tem como produto um gel expansivo em contato com a água.

Assim, como na confecção do concreto branco para este trabalho, há substituição do agregado convencional, por um agregado proveniente do rejeito de ágata, que é constituída, basicamente, por sílica e a sílica, por sua vez, é o principal constituinte responsável pelo desenvolvimento da reação álcali-agregado (RAA) nas estruturas de concreto. Faz-se necessária a verificação da reatividade que este agregado possa apresentar ao longo do tempo. Os estudos de durabilidade dentro da Engenharia Civil, em geral, são realizados através de ensaios acelerados, como por exemplo, os ensaios de corrosão da armadura, carbonatação, penetração de cloretos, entre outros. No entanto em se tratando de avaliações do desempenho de agregados reciclados, o ensaio mais adequado para medir a durabilidade do concreto é o ensaio acelerado da reação álcali-agregado. Uma revisão mais aprofundada se fará no próximo capítulo.

5 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é um fenômeno químico que ocorre entre os hidróxidos alcalinos provenientes das reações de hidratação do cimento e alguns dos constituintes mineralógicos dos agregados no concreto. Em presença de água o gel formado a partir da reação química expande, provocando fissuração do concreto. Para a ocorrência desse fenômeno existem alguns fatores intervenientes, tais como a composição química do cimento e dos agregados (minerais constituinte das rochas e areias). Dependendo do tipo de mineral envolvido na RAA, esta pode ser classificada, em (PRISZKULNIK, 2005, p. 1023):

reação álcali-sílica – envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais;

reação álcali-silicato – é da mesma natureza da reação álcali-sílica, porém, o processo ocorre mais lentamente, envolvendo alguns silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares, (como as grauvacas), metamórficas, (como os quartzitos) e magmáticas (como os granitos) e, fundamentalmente, a presença do quartzo deformado (tensionado) e mineral expansivos;

reação álcali-carbonato – em concreto preparado com agregado calcário-dolomítico;

Existem vários ensaios para avaliação da reatividade álcali-agregado, e vários também são os questionamentos a respeito da eficiência dos mesmos. Para se conhecer o mecanismo da reação e a potencialidade reativa do agregado deverá haver uma análise de um conjunto de pareceres. Segundo Tiecher (2006), tanto a granulometria dos agregados empregados no concreto, quanto à mineralogia da rocha matriz são responsáveis por ocasionar a reação. Além disso, a quantidade de álcalis dos cimentos também é um fator importante a ser considerado.

Andriolo (1997), pesquisando a reação álcali-sílica, verificou que o processo ocorre devido não somente à reação química entre álcalis do cimento e o mineral do agregado, senão também, à fatores como a água do amassamento e agentes externos como umidade e temperatura, resultando em expansões com ou sem gel, porém sempre ocasionando fissuras, aumento da permeabilidade e influenciando diretamente nas resistências mecânicas do concreto. Ainda em outro estudo, Metha e Monteiro (2008) acrescentam que há perdas também do módulo de elasticidade e por consequência redução da durabilidade.

Andriolo (1997) descreve a reação álcali-sílica classificando-a como sendo em pequena e alta escala de reação. Os aspectos representativos da pequena escala são as microfissuras no concreto, mais especificamente na argamassa que preenche os espaços entre os agregados graúdos, inclusive com perda da argamassa existente ao redor dos agregados formando uma borda de gel, causando o descolamento do mesmo e a formação de fissuras próximas ou na própria superfície do agregado. A descrição para a classificação em alta escala inicia-se quando há penetração e expansão do gel nas fissuras. Estas com características de panorama poligonal, havendo predominância na direção da maior dimensão da estrutura; nas extremidades, com característica de esfoliamento; com grande abertura, transversais à maior dimensão da estrutura e em regiões de concentração de deformações com tipologia estrutural. Movimentações de juntas de contração e de superfícies livres como alteamento de cristas de barragens, soleiras de vertedouros e deflexões para montante nas estruturas de barragens são comuns como consequências destes vários tipos de fissuras.

Tiecher (2006), afirma serem os íons alcalinos sódio (Na^+), potássio (K^+) e os íons hidroxilas (OH^+), provenientes do cimento, os principais responsáveis pela ocorrência da RAA. Estes componentes do cimento em combinação com a sílica amorfa, ou microcristalina, presente nos agregados ocasionam a chamada reação álcali-sílica.

Essa reação ocorre devido à sílica amorfa apresentar várias entradas para a penetração generalizada dos hidróxidos alcalinos, quebrando as ligações do silício com o oxigênio e propiciando a formação do gel expansivo, do contrário quando a sílica é bem cristalina, o ataque dos íons dá-se somente na superfície externa, ocasionando uma reação muito lenta (GLASSER⁶, 1992 apud TIECHER, 2006).

Estudos realizados por Paulon (1981, p. 11-16) mostram que as rochas desencadeantes da reação deletéria possuem formas bem definidas de sílica metaestável (tridimita e cristobalita), sílica microcristalina amorfa como a opala, e sílica em forma de quartzo criptocristalino como a ágata, sendo esta última a forma mais desordenada e reativa classificada como rocha de alta acidez. Outro exemplo de mineral reativo, presente em rochas chamadas ácidas é o vidro natural vulcânico, composto de grandes quantidades de quartzo.

⁶ GLASSER, F. P. **The chemistry of the alkali-silica reaction.** THE ALKALI-SILICA reaction in concrete. London: R. N. Swamy; London, 1992, p. 30-52.

O mesmo autor, analisando microscopicamente o gel exsudado, composto basicamente de sílica e álcalis, verificou que sua estrutura interna possui propriedades bem definidas em todas as direções (isotropismo), podendo se apresentar algumas vezes, como estrutura anisotrópica, devido às cristalizações parciais e à presença de pequenas inclusões.

Por outro lado, existe a reação álcali-silicato, muito similar à reação álcali-sílica, mas com um processo de avanço mais lento, causada pela presença silicatos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas (KIHARA⁷, 1986 apud HASPARYK, 2005; HOBBS⁸, 1988 apud HASPARYK, 2005), que não será desenvolvida neste trabalho.

Outra reação existente é a álcali-carbonato, formada pelo mineral dolomita presente nos agregados de calcário e que também reagem com os álcalis do cimento formando a brucita ($Mg(OH)_2$) e a regeneração de hidróxidos alcalinos, processo também conhecido como desdolomitização. A desdolomitização gera fissurações e enfraquecimento da zona de transição, sendo que a reação ocorre com a máxima intensidade quando a calcita e a dolomita estiverem presentes em quantidades equivalentes ou ambas finamente divididas (PAULON, 1981). Segundo Tiecher (2006) mesmo não havendo formação do gel expansivo como na reação álcali-sílica ainda há lacunas nas formas eficientes de controlar a reação álcali-carbonato causando preocupação quando da existência de minerais carbonáticos nos agregados utilizados em concretos.

Ainda conforme Tiecher (2006), para nenhum dos três tipos de reações citadas neste texto são conhecidas formas específicas e únicas de interromper o processo de suas formações ou mesmo impedi-lo que ocorra. Conhecem-se apenas adições ou aditivos capazes de minimizar o desenvolvimento das mesmas. Como é o caso dos materiais pozolânicos ou com características pozolânicas, que além de melhorar as propriedades do concreto são capazes de inibir a formação da reação álcali-agregado. Exemplos destas adições podem ser citadas: a sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante, cinzas de casca de arroz e metacaulin. Mesmo com esta variedade de opções deve-se tomar grande cuidado ao utilizá-las para não haver o agravante da reação como consequência.

⁷ KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In SIMPOSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. *Anais...*São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986. p. 127-138.

⁸ HOBBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London, Thomas Telford, 1988.

Kuperman (2005) alerta que a utilização destas adições no concreto, deve ser criteriosa, observando suas propriedades e quais as porcentagens mínimas necessárias para o agregado em questão, pois um uso inadequado não garantirá a neutralização da reação álcali-agregado. O mesmo autor ainda exemplifica que, segundo as normas brasileiras, os cimentos pozolânicos admitem uma variação de teores de adição que vão de 15% a 50% e nos cimentos de alto forno de 35% a 70%, por outro lado a sílica ativa por ter altos teores de sílica reativa e níveis baixos de cálcio e metais alcalinos, tende a ser muito eficiente e pode ser usada com baixos teores de substituição, variando normalmente de 7% a 15%. O estudo apresentado por Munhoz (2007) indica que a sílica ativa é a adição mais eficiente na mitigação do processo das reações, em segundo lugar o metacaulin e em terceiro a cinza volante, o estudo feito mostrou que a escória de alto forno, como substituição do cimento, necessitaria de quantidades até seis vezes maiores para alcançar níveis similares aos conseguidos com sílica ativa.

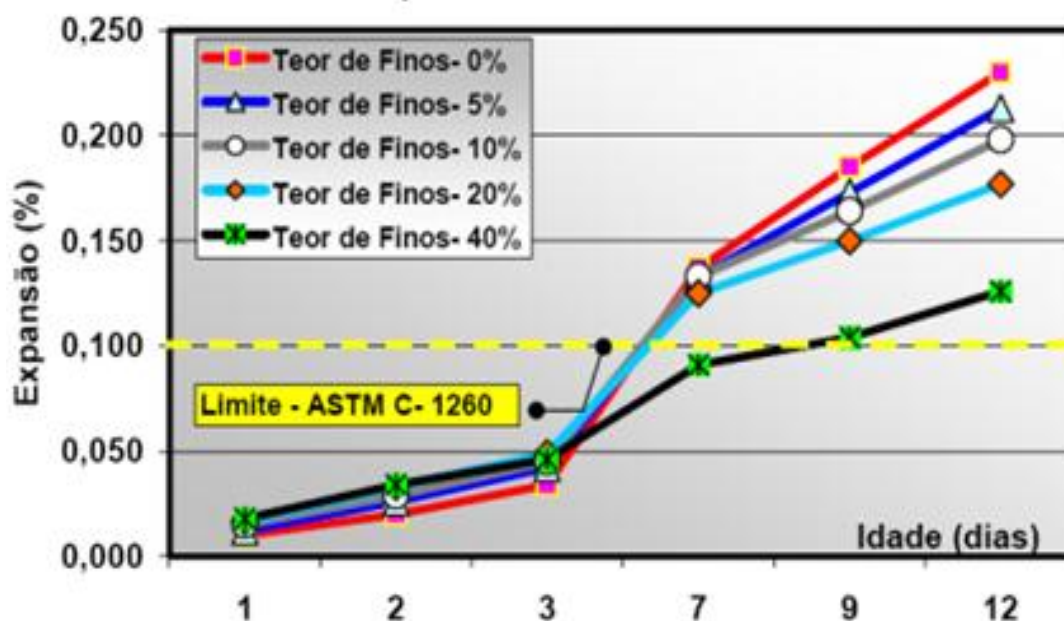
A sílica ativa é um subproduto da indústria de ligas ferrosas, constituída de partículas extremamente pequenas de sílica amorfa (84% a 90%), contendo também pequenas quantidades de ferro, alumina, cal e álcalis dependendo das variações das ligas produzidas. (ANDRADE, 1997).

Ainda no mesmo trabalho o autor explica que o mecanismo de funcionamento dessa adição na substituição de parte do cimento resulta, nesta mistura, menor quantidade de álcalis. Sendo o principal elo para a inibição da reação álcali-agregado, a pozolana incorpora a portlandita que é produzida na hidratação do cimento Portland, gerando hidratos secundários que incorporam os íons alcalinos da solução dos poros, diminuindo a mobilidade de íons livres capazes de reagir e alterando o pH da solução para níveis mais baixos. Para comprovar isso Andriolo (2006) realizou ensaio que mostra, através do gráfico 1, a influência da adição de finos menores que 0,075 mm utilizando o próprio agregado reativo, porém como pó-de-pedra, verificando que houve a mitigação da reação com o acréscimo do teor de finos (ANDRADE, 1997).

Em estudos anteriormente realizados, a explicação para o ensaio de Andriolo (2006), já teria sido registrado fundamentado na hipótese de que os finos das próprias areias britadas se tornariam aglomerantes, pela energia eletrostática liberada na quebra das moléculas no momento da britagem, sendo que, essa característica adquirida, se estabilizaria com o tempo

pela aproximação novamente das moléculas na compactação. Na avaliação de ensaios realizados com agregado de arenito e adição de quartzito houve uma redução na expansão quando o cimento foi repostado pelo mesmo agregado, contudo verificou-se que não poderia ser usado indiscriminadamente, pois em corpos-de-prova moldados com agregados recém-britados houve queda na resistência, em comparação a outros moldados com agregados britados com um mês de antecedência (ANDRADE, 1997).

Gráfico 1 – Influência do teor de finos na expansão devido a RAA



(fonte: ANDRIOLO, 2006)

A partir desta exposição de conceitos apresentados por diversos autores, tanto referente à ágata (capítulo 3), quanto aos materiais empregados em concreto branco e suas características de resistência e durabilidade (capítulo 4), se observa a importância da caracterização de agregados reciclados de ágata frente à reação álcali-agregado, principalmente por sua composição química ser basicamente quartzo. Somente a partir da comprovação de sua eficiência frente a este ensaio é que poderá se pensar na sua utilização em concretos brancos ou convencionais com cimento cinza. Para tanto, se expõem o programa experimental deste estudo.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um programa experimental que possibilitou a análise do comportamento do agregado reciclado de ágata em concretos com cimento Portland branco no que diz respeito à potencialidade de desenvolvimento da RAA.

A avaliação da reatividade foi realizada através da análise petrográfica e do ensaio acelerado das barras de argamassa, normalizado pela NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c).

A seguir são apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados neste trabalho.

6.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho são:

- a) aglomerantes:
 - cimento Portland branco estrutural, importado;
 - cimento CPV- alta resistência inicial e resistente a sulfatos;
 - cimento padrão da Associação Brasileira de Cimento Portland;
- b) agregados:
 - miúdo britado de calcário;
 - miúdo britado e reciclado de ágata;
 - areia padrão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
- c) adições: sílica ativa;
- d) água.

Os materiais empregados como agregados miúdos, para uso com o cimento branco, para este trabalho, são de coloração clara, visando não interferir na aparência final do concreto endurecido. Na pesquisa bibliográfica constatou-se que vários pesquisadores confirmam que são os agregados miúdos os que conferem a cromaticidade final ao concreto branco. Neste sentido, é válida a utilização dos agregados miúdos reciclados de ágata, visto que, após a

britagem, apresentam uma coloração clara. Para os cimentos de coloração cinza, foram também ensaiados, além da ágata britada, areia natural como agregado miúdo. O uso do cimento cinza nos ensaios foi comparativo, pois vislumbra-se também a possibilidade de utilização destes agregados reciclados em outros concretos.

As caracterizações dos cimentos branco e cinzas foram feitas conforme as recomendações das Normas Brasileiras. O cimento, os agregados miúdo e graúdo foram doados por uma empresa apoiadora no desenvolvimento do estudo. A seguir serão descritas as características de cada um destes materiais, citando as normas em que se basearam os ensaios de caracterização.

6.1.1 Aglomerantes

Nos itens a seguir estão descritos os aglomerantes utilizados e suas características.

6.1.1.1 Cimento Portland branco estrutural

Para o aglomerante utilizado, cimento Portland branco estrutural, foram realizados ensaios de caracterização, para confirmar que estivesse dentro dos padrões necessários, já que ele é um material importado. Verificou-se também que sua origem fosse de um único lote de fabricação. As caracterizações química, física e mecânica deste cimento foram realizadas no laboratório da Fundação de Ciência e Tecnologia (Cientec). Os resultados perante as exigências da Norma são mostrados nos tabelas de 5 a 7⁹.

Tabela 5 – Caracterização física do cimento branco utilizado

Finura	Resíduo retido na peneira n° 200	0,20%
Pasta de consistência normal	30,0% de água	
Tempos de Pega	Início	2h20min
	Fim	3h05min
Expansibilidade	A frio	0,0 mm
	A quente	0,0 mm
Superfície específica “Blaine”	3820 cm ² /g	
Massa específica absoluta	3,06 g/cm ³	

(fonte: não publicado)

⁹ Resultados dos ensaios feitos pela Cientec em cimento Portland branco em 6 de dezembro 2011.

Tabela 6 – Caracterização química do cimento branco utilizado

Determinação (%)	“Amostra 01 - Cimento Branco Aalborg White”
Resíduo insolúvel	0,21
Perda ao fogo	3,72
Óxido de cálcio (CaO)	67,5
Óxido de silício (SiO ₂)	22,4
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	1,68
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,29
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,19
Óxido de magnésio (MgO)	0,27
Óxido de enxofre (SO ₃)	1,62
Óxido de potássio (K ₂ O)	<0,06
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,05

(fonte: não publicado)

Tabela 7 – Caracterização mecânica do cimento branco utilizado

Idade (dias)	Média	Desvio relativo máximo (%)
1	15,4	1,9
3	31,4	0,3
7	40,5	2
28	52,6	1,9

(fonte: não publicado)

6.1.1.2 Cimento Portland V de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos (CP V-ARI/RS)

O cimento CP V-ARI/RS, de cor cinza, foi escolhido como forma de comparar as expansões decorrentes da RAA provocadas pela mistura de agregado reciclado de ágata e cimento branco.

Conforme tabelas de 8 a 10, onde constam as informações fornecidas pelo fabricante, o cimento CP V-ARI/RS empregado possui massa específica de 3,02 g/cm³ e finura 5118 cm²/g. Além disso, por ter teores de adição mineral de até 34%, este cimento pode ser capaz de inibir as expansões decorrentes da RAA.

Tabela 8– Caracterização física do cimento CP V-ARI/RS utilizado

Tempos de Pega	Início	252 min
	Fim	321 min
Expansão a quente	$\leq 5,0$ mm	
Superfície específica “Blaine”	5118 cm ² /g	
Massa específica absoluta	3,02 g/cm ³	

(fonte: não publicado)

Tabela 9 – Caracterização mecânica do cimento CP V-ARI/RS utilizado.

Idade (dias)	Média
1	24,83
3	34,72
7	39,63
28	46,91

(fonte: dados do fabricante) ¹⁰

Tabela 10 – Caracterização química do cimento CP V-ARI/RS utilizado

Determinação (%)	Amostra
Resíduo insolúvel	9,3
Perda ao fogo	4,5
Óxido de Magnésio (MgO)	5,59
Óxido de Enxofre (SO ₃)	2,81
Oxido de Cálcio	54,00
Oxido de Silício	21,00
Óxido de Alumínio	5,48
Óxido de Ferro	3,3
Óxido de Titânio	0,34
Óxido de Potásio	0,95
Óxido de Sódio	0,30
Óxido de Cálcio livre	0,88

(fonte: não publicado)

¹⁰ Dados fornecidos pelo fabricante do cimento, Votorantim Cimentos S.A, 2011.

6.1.1.3 Cimento padrão ABCP

O cimento padrão produzido pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), atendendo a NBR 5732 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991), foi utilizado neste trabalho por ser um cimento puro (CP I), com limitação no teor de álcalis e sem quaisquer adições além do sulfato de cálcio (utilizado como retardador da pega), com expansão em autoclave e uma finura muito difícil de ser conseguida em algum outro cimento no mercado para os limites estabelecidos pela Norma de reação álcali-agregado. Conforme a Norma, suas características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas de 11 a 13.

Tabela 11 – Caracterização física do cimento ABCP utilizado

Finura	75 μ m	0,09%
	45 μ m	2,20%
Pasta de consistência normal	29,4% de água	
Tempos de Pega	Início	3h04min
	Fim	5h15min
Expansibilidade	A frio	0,0 mm
	A quente	0,5 mm
Superfície específica “Blaine”	4920 cm ² /g	
Massa específica absoluta	3,09 g/cm ³	

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012)¹¹

Tabela 12 – Caracterização mecânica do cimento ABCP utilizado.

Idade (dias)	Média
1	25,40
3	38,50
7	42,40
28	50,70

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012)

¹¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012.

Tabela 13 – Caracterização química do cimento ABCP utilizado

Determinação (%)	Amostra
Resíduo insolúvel	0,31
Perda ao fogo	3,05
Óxido de cálcio (CaO)	62,33
Óxido de silício (SiO ₂)	19,52
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,80
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,26
Óxido de magnésio (MgO)	1,90
Óxido de enxofre (SO ₃)	3,64
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,87
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,32

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012)

6.1.2 Agregados

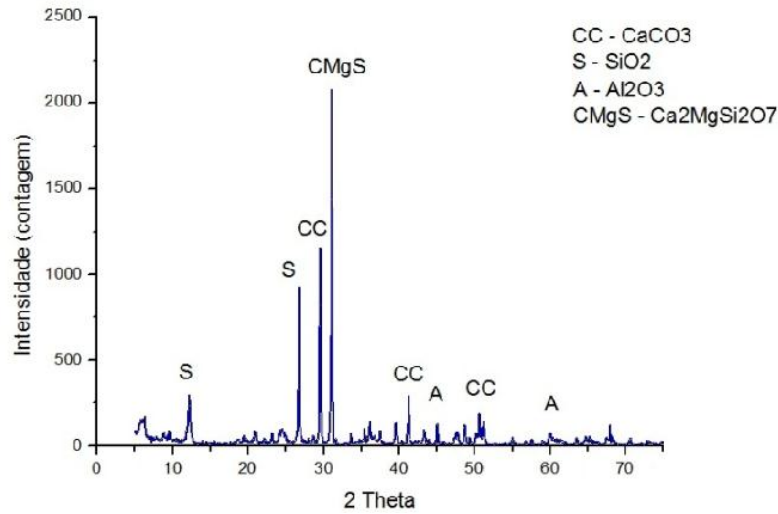
Com o propósito de manter a brancura dos concretos a serem moldados com cimento Portland branco, foi tomado o cuidado de utilizar agregados miúdos que conferissem esta característica final aos mesmos. Assim, os agregados miúdos utilizados foram: areia de britagem calcária, utilizada em larga escala com cimento branco, disponível comercialmente na granulometria de areia, e resíduo de ágata, que foi britado até atingir a composição especificada por Norma para utilização em concretos. As características físicas e a distribuição granulométrica destas areias estão relacionadas nos próximos itens. Como parâmetro de referência inócuo na avaliação da reatividade dos agregados, foi empregada a areia normalizada do Instituto de Pesquisa e Tecnologia de São Paulo (IPT).

6.1.2.1 Areia de britagem calcária

A areia de britagem calcária é empregada neste estudo com a granulometria original que é fornecida no mercado. Justifica-se a escolha desta areia neste trabalho em função de seu uso com cimento branco em grandes obras, reconhecendo sua qualidade.

Não somente utilizado em concretos brancos, o calcário é um agregado convencional da indústria da construção, pode ser dolomítico ou calcítico e encontra-se geralmente disponível no mercado nacional. Neste estudo não se procedeu à quantificação de calcita e dolomita existente na composição, apenas a sua identificação como consta no gráfico 2.

Gráfico 2 – Difratoograma de raio X de areia artificial de calcário



(fonte: elaborada pelo autor)

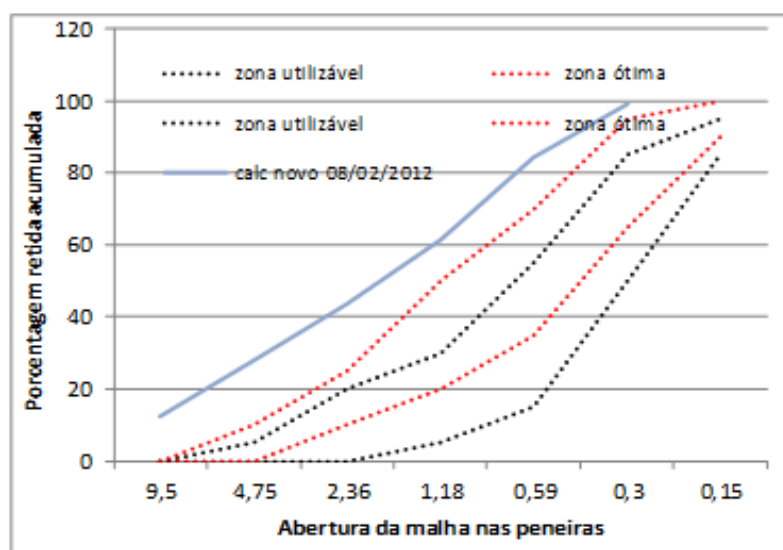
Em uma análise inicial de suas propriedades granulométricas comprovou-se que estas estavam fora do especificado pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Assim, houve a necessidade de fazer uma composição granulométrica para que a areia de britagem calcária ficasse dentro das zonas utilizáveis determinadas pela referida Norma, como é mostrado na tabela 14. O gráfico 3 permite visualizar a composição original do agregado, localizada próxima da zona utilizável.

Tabela 14 – Porcentagens granulométricas de areia de britagem calcária

Determinações	Método de ensaio	Resultados Obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NBR 7217	4,8	0	0
		2,4	15	15
		1,2	24	39
		0,6	18	57
		0,3	15	72
		0,15	16	88
		< 0,15	12	100
Dimensão máxima característica	NBR 7217	4,8 mm		
Módulo de finura	NBR 7217	2,68		
Massa específica	NBR 9776	2,59 kg/dm ³		

(fonte: elaborada pelo autor)

Gráfico 3 – Granulometria de areia de britagem calcária



(fonte: elaborada pelo autor)

6.1.2.2 Areia artificial de ágata reciclada

O objetivo principal deste estudo é avaliar o uso da areia artificial de ágata reciclada nos concretos em geral e, principalmente em concretos de cimento Portland branco. Como se trata de um material cujas características são pouco conhecidas foram feitas várias análises, como por exemplo: a difratometria de raios x, a fluorescência de raios x e a análise granulométrica, com a intenção de verificar a composição do resíduo.

Inicialmente o trabalho seria desenvolvido com resíduos de maior dimensão (como podem ser visualizados na figura 8), britados por equipamento para obtenção de areias. Nesta etapa, além de avaliar-se o melhor equipamento a ser empregado no processo, também a granulometria foi avaliada, não somente pela forma e tamanho dos grãos obtidos, mas também pela contaminação provável causada pelo desgaste do equipamento, ocasionado pela dureza dos resíduos de ágata.

6.1.2.3 Areia padrão do Instituto de Pesquisas e Tecnologia

Produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, a areia normal brasileira, como também é conhecida, é um material de referência utilizado por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físico-mecânicos para caracterização de cimento Portland. Segundo a NBR 7214 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982), a areia-padrão é definida como material natural quartzoso extraído do Rio Tietê, em São Paulo

e fornecida em frações granulométricas distintas, ou seja, grossa classificada na peneira 1,18 mm, média grossa correspondendo à peneira 0,6 mm, média fina representando a peneira de malha 0,3 mm e a fina que corresponde à peneira de malha 0,15 mm.

6.1.3 Adições

Com objetivo de avaliar formas de mitigação da reatividade dos agregados de ágata, neste estudo foi utilizada adição de sílica ativa aos cimentos, em teores geralmente acrescentados diretamente em concretos, conforme NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). O uso de adições ativas, como a sílica, confere aos cimentos propriedades específicas, tais como: baixa permeabilidade, aumento nas resistências mecânicas do concreto, resistência ao ataque de sulfatos, melhora na durabilidade, minimização da reação álcali-agregado, entre outras.

A sílica ativa é um tipo especial de pozolana quimicamente composta apenas com SiO_2 (> 86%), principalmente por ter fase vítrea e amorfa, podendo também ser encontrados compostos cristalinos como carbeta de silício e cristobalita. Esta adição é conhecida pela sua eficiência na prevenção da ocorrência da reação álcali-agregado (RAA), como é citada na NBR 15577-5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008d).

6.1.4 Água

Para a moldagem dos corpos-de-prova utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento local.

6.2 MÉTODOS

A avaliação da potencialidade reativa do agregado foi analisada pelo método acelerado em barras de argamassa e análise petrográfica. Além dessas técnicas, o mineral reativo também foi verificado através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A seguir, a descrição dos métodos utilizados.

6.2.1 Análise petrográfica do agregado reciclado de ágata

Seguindo a NBR 15577-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b), foi realizada análise petrográfica para a investigação da potencialidade reativa do agregado. Este ensaio fornece informações sobre a composição mineralógica, isto é, a presença, ou não, de constituintes no agregado capazes de reagir com os álcalis do cimento, bem como seu porcentual. O ensaio foi realizado em lâminas preparadas com o agregado, observadas em microscópio ótico de luz transmitida, marca Zeiss, com câmera fotográfica acoplada, imagens BSE, bem como em microscópio eletrônico de varredura (MEV), em análise através do detector de elétrons secundários e análise química através da sonda EDS.

As análises através de microscopia ótica foram realizadas no Departamento de Mineralogia – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGeo/UFRGS). As observações através de MEV e as análises através de EDS foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME/UFRGS), sendo utilizado um microscópio eletrônico da marca JEOL – JSM 6060.

6.2.2 Ensaio acelerado das barras de argamassa

O ensaio acelerado das barras de argamassa é descrito pela NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c). A referida Norma estabelece as características do cimento a ser empregado no ensaio. No Brasil, a Associação Brasileira de Cimento Portland produz um cimento padrão para realização do ensaio acelerado.

Foram formuladas combinações de agregados e cimentos para as barras confeccionadas e ensaiadas. Estas combinações servirão para direcionar a análise de qual a melhor combinação para o uso do agregado reciclado de ágata. A tabela 15 correlaciona os cimentos e os agregados como foram usados.

Tabela 15 – Combinações de agregados, cimentos e adições ensaiados

Cimentos	Agregados			Cimentos com % substituição de sílica ativa			
	IPT	ÁGATA	CALCÁRIO	IPT + 5%	IPT + 10%	ÁGATA + 5%	ÁGATA + 10%
CP V ARI/RS	x	x		x	x	x	x
CPB		x	x				
ABCP	x	x		x	x	x	x

(fonte: elaborada pelo autor)

O ensaio avalia a reatividade do agregado frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH). No acompanhamento do ensaio são realizadas medições periódicas da variação de comprimento das barras de argamassa. O quadro 2, obtido da NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c), apresenta os graus de reatividade estabelecidos para classificar os agregados.

Quadro 2 – Classificação de potencialidades

Expansão das barras de argamassa aos 28 dias (%)	Classificação da reatividade potencial do agregado	Medida de Mitigação decorrente da Intensidade da Ação Preventiva
Menor que 0,19%	Potencialmente inócuo	Desnecessária
Entre 0,19 e 0,40%	Potencialmente reativo grau 1	Mínima
Entre 0,41 e 0,60%	Potencialmente reativo grau 2	Moderada
Maior que 0,60%	Potencialmente reativo grau 3	Forte

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c)

Para a produção das argamassas e posterior confecção das barras os agregados, com exceção da areia padronizada do IPT, passam por processo de britagem até atingir uma classificação adequada conforme Norma acima referida. Após a separação granulométrica devem ser lavados com água corrente e secados, para depois serem armazenados por frações, em local limpo, seco e fechado. Este processo visa retirar as partículas finas dos agregados.

Seguindo a padronização do método, a argamassa foi moldada conforme os quantitativos da tabela 16, com relação água/cimento (a/c) fixa de 0,47 e uma proporção dos cimentos e agregados das combinações de 1:2,25, correspondendo a 440 g de cimento e 990 g de agregado. De cada mistura foram confeccionadas três barras para análise.

Segundo a NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c), devem ser moldadas no mínimo três barras de argamassa no mesmo momento, sendo que o equipamento usado foi uma argamassadeira mecânica. Como este trabalho compara expansões obtidas, procurou-se fazer sempre a mesma sequência de passos na moldagem das barras. Ainda enquanto secas as diferentes granulometrias de cada agregado devem ser pré-misturadas, obtendo assim maior homogeneidade do agregado miúdo.

Tabela 16 – Granulometria de material para confecção das barras

Peneiras com abertura de malha		Quantidade do material em massa	
Passante	Retida	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99
2,36 mm	1,18 mm	25	245
1,18 mm	600 μm	25	245
600 μm	300 μm	25	245
300 μm	150 μm	15	148,5

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c)

O primeiro passo para a mistura dos componentes é a colocação da água na argamassadeira, a seguir coloca-se o cimento misturando por 30 segundos, acrescenta-se o agregado pré-misturado misturando por 30 segundos em velocidade lenta e mais 30 segundos em velocidade alta. Para-se a mistura por 1 minuto e 30 segundos, removendo o que ficou aderido às paredes nos primeiros 30 segundos, reiniciando com velocidade alta durante mais 30 segundos. As formas usadas, para colocação da argamassa, de dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, foram previamente protegidas com filme plástico (figura 10) e os parafusos com a extremidade envolta em veda-rosca, a fim de que não haja aderência da argamassa, facilitando a desmoldagem. A seguir, após a última mistura, inicia-se a moldagem propriamente dita em duas camadas com 20 golpes em cada, conforme a figura 11, tomando-se o cuidado de não deixar vazios nas formas.

Ainda quando em estado fresco as barras são alisadas e retirados os excessos de argamassa. A seguir são identificadas com o nome dos constituintes da mistura, número de identificação em relevo e data de moldagem.

Figura 10 – Formas e parafusos protegidos



(fonte: foto do autor)

Figura 11 – Moldagem das barras



(fonte: foto do autor)

O ensaio regido pela NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c) possui como um dos seus objetivos, verificar a ocorrência da reação pela variação do comprimento de barras confeccionadas em argamassas, produzidas na combinação de cimento com o agregado reciclado.

Assim, depois de moldadas, as barras são reservadas com a superfície coberta, em câmara úmida com temperatura controlada, durante as primeiras 24 horas e a seguir desmoldadas. Após a desforma foram colocadas imersas em água potável em um recipiente capaz de elevar gradativamente a temperatura da água até $80^{\circ}\pm 2^{\circ}$ C.

Passado um período de 24 horas e atingida a estabilização, as barras são retiradas do banho com água e medidas individualmente com um extensômetro com precisão de 0,001mm (figura 20). São feitas medições de dimensionamento, de duas faces opostas, com precisão de 0,002 mm. O tempo do procedimento não deve exceder a 15 segundos, para garantir que a primeira medição não apresente variação maior que 2° C na sua temperatura.

Figura 12 – Barra em medição no extensômetro



(fonte: foto do autor)

Em seguida da medição, as barras foram colocadas em outro tanque de aço inox (figura 13), com solução de hidróxido de sódio aquecida a 80° C, na concentração de 1M de NaOH, onde permanecem por no mínimo 28 dias, repetindo o processo de medições periódicas.

Figura 13 – Tanque de inox com as barras posicionadas em pé imersas em solução



(fonte: foto do autor)

7 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas a análise e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios executados no programa experimental, descritos no capítulo 6.

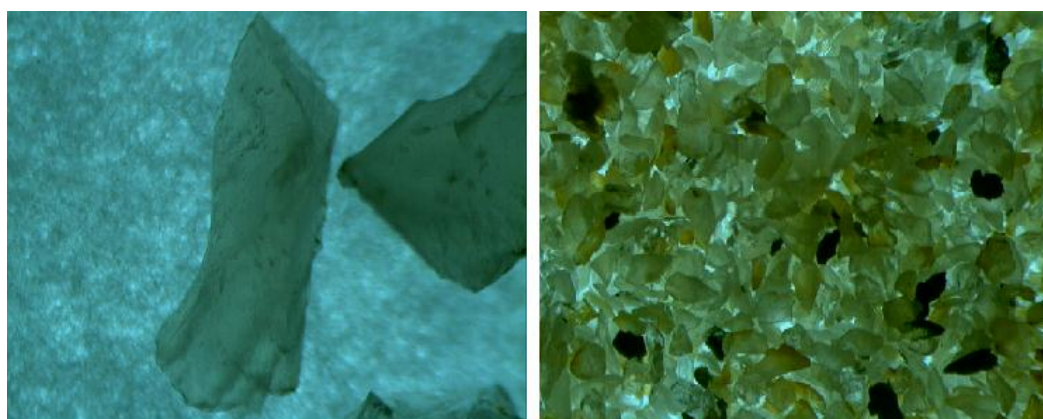
7.1 AREIA ARTIFICIAL DE ÁGATA RECICLADA

Para este trabalho foi coletada uma amostra de resíduos de ágata na cidade de Soledade.

Inicialmente para avaliar a produção do agregado a partir dos resíduos foi avaliado a sua britagem. Os equipamentos testados foram: moinho de bolas, dois modelos de britador de mandíbulas, moinho de rolo, dois moinhos martelos e um britador de escala industrial.

Um dos diferenciais no resultado de cada equipamento foi a forma de grão produzido. Todos os equipamentos excetuando-se, o moinho de bolas e de martelos, geraram grãos lamelares (figura 14), alongados e por vezes com espessuras milimétricas, que os caracterizaria inadequados para uso em concretos.

Figura 14 – Grãos lamelares obtidos em britadores



(fonte: foto do autor)

Conforme Metha e Monteiro (2008), a forma e a textura das partículas dos agregados influenciam preponderantemente nas propriedades do concreto no estado fresco (trabalhabilidade, quantidade da água de amassamento, entre outras), sendo que partículas de

textura áspera, angulosas e alongadas, como as do calcário, requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis.

Outro critério considerado foi a produtividade e rendimento da britagem em si, porque há equipamentos que, a exemplo do moinho de bolas, levariam muitas horas de processo para se conseguir pequenas quantidades, tornando-se inviável até pelo consumo de energia gerado.

Contudo, todos os equipamentos utilizados tiveram alto desgaste no metal constituinte da peça em contato com a ágata no momento da britagem, o que prejudica a coloração deste agregado depois de britado, muitas vezes contaminando-o.

Em termos físicos, o britador que resultou melhores características foi um equipamento com produção em escala de laboratório, mostrado na figura 15, um britador de martelos da marca Plangg, com capacidade aproximada de 60 kg/h, localizado no Laboratório de Processamento Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS-LAPROM). Os agregados reciclados de ágata, britados neste equipamento, apresentaram curva granulométrica muito próxima aos agregados naturais localizados dentro da zona utilizável descrita conforme a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). A análise visual do agregado miúdo obtido apresenta-se menor e menos lamelar dos que os britados, para teste, em um britador de mandíbulas, tendo assim a condição de produzir concretos com maior trabalhabilidade. Porém, a utilização deste equipamento se tornou inviável.

Figura 15 – Britador de martelos

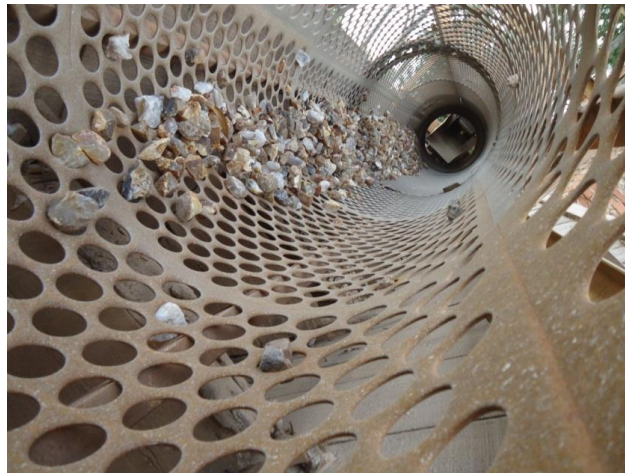


(fonte: foto do autor)

Assim, optou-se em usar para os ensaios, geodos britados em uma empresa de Soledade que utiliza a britagem com equipamento de grande porte para a diminuição destes, podendo beneficiar pedaços menores para o processo de rolagem.

Os geodos que foram usados eram os que passavam pelo conduto de ferro (figura 16), que faz o peneiramento do material britado. O material em frações menores é disposto em tanques conforme granulometria (figura 17). O equipamento utilizado é um britador de mandíbulas, conforme mostra a figura 18.

Figura 16 – Detalhe do sistema de peneiramento



(fonte: foto do autor)

Figura 17 – Separação de granulometrias em bombonas



(fonte: foto do autor)

Figura 18 – Detalhe das mandíbulas com ferros soldados



(fonte: foto do autor)

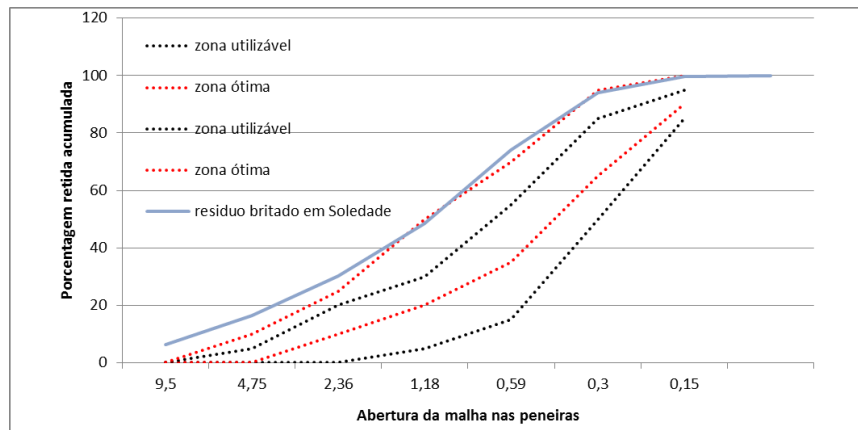
A granulometria obtida está especificada na tabela 17 e o gráfico 4 apresenta a sua curva granulométrica.

Tabela 17 – Granulometria do agregado miúdo reciclado de ágata

Determinações	Método de ensaio	Resultados Obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NBR 7217	4,8	6	6
		2,4	20	26
		1,2	25	51
		0,6	19	70
		0,3	14	84
		0,15	10	94
		< 0,15	6	100
Dimensão máxima característica	NBR 7217	6,3 mm		
Módulo de finura	NBR 7217	4,31		
Massa específica	NBR 9776	2,65 kg/dm ³		

(fonte: elaborada pelo autor)

Gráfico 4 – Granulometria do agregado reciclado de ágata

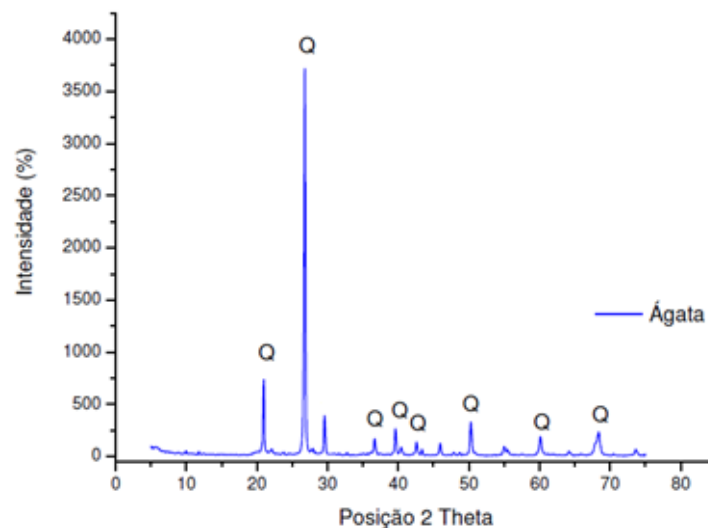


(fonte: elaborada pelo autor)

Outra característica obtida foi a composição mineralógica do resíduo de ágata, examinada através do ensaio de difratometria de raios x e análise química.

Este ensaio foi realizado no equipamento Lab Center XRF – 1800, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no laboratório de Cerâmica (LACER). O gráfico 5 apresenta os resultados obtidos para difratometria e aponta como resultado a preponderância do mineral quartzo.

Gráfico 5 – Difratometria de raios X do agregado reciclado de ágata



(fonte: elaborada pelo autor)

Na tabela 18 abaixo, ainda como parte da caracterização, pode ser visualizado o resultado da fluorescência de raios X. O resultado confirma uma porcentagem de 97,1% de fase única de dióxido de silício (SiO₂).

Tabela 18 – Fluorescência de raios X

Date : 2011-07-14 10:29:44

[Quantitative Result]

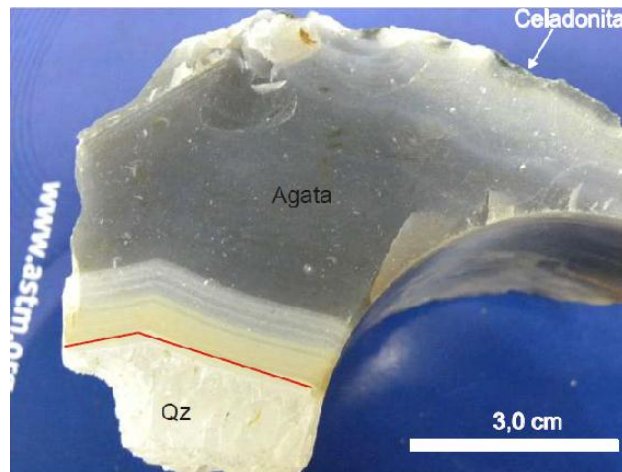
Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO2	97.0602 %	Quant.-FP	SiKa	1526.137	5.200
Al2O3	1.8459 %	Quant.-FP	AlKa	36.223	2.365
Na2O	0.1415 %	Quant.-FP	NaKa	0.383	0.087
K2O	0.1400 %	Quant.-FP	K Ka	5.739	0.534
CaO	0.1374 %	Quant.-FP	CaKa	4.519	0.632
Fe2O3	0.0666 %	Quant.-FP	FeKa	4.324	1.529
In2O3	0.0383 %	Quant.-FP	InKa	5.087	36.438
CO2	0.5700 %	Fix	-----	-----	-----

(fonte: resultados gerados pelo software do equipamento)

7.1.1 Análise petrográfica do resíduo de ágata

O fragmento do geodo analisado, para este trabalho, mostra ser constituído por quartzo branco de grão grosso (Qz) com cristais de dimensões centimétricas, ágata apresentado bandamento concêntrico com alternância de bandas milimétricas de cores cinza e branca, bem marcada nas porções internas, ou em algumas regiões lisa sem bandamento. As bandas brancas mostram, por vezes, tons amarelados decorrentes da presença de óxido de ferro. As zonas sem bandamento ou com bandamento incipiente têm cor cinza dominante e cor branca em menor proporção, sendo esta localizada na porção externa do geodo. A ágata é predominante em volume, ocupando mais de 90% do espaço do geodo a partir das paredes, ficando o quartzo na porção central. Uma fina camada verde, formada por celadonita (argila não expansiva), envolve toda a superfície externa do geodo. A linha vermelha visualizada na figura 19 marca o limite aproximado entre o quartzo macrocristalino e a ágata.

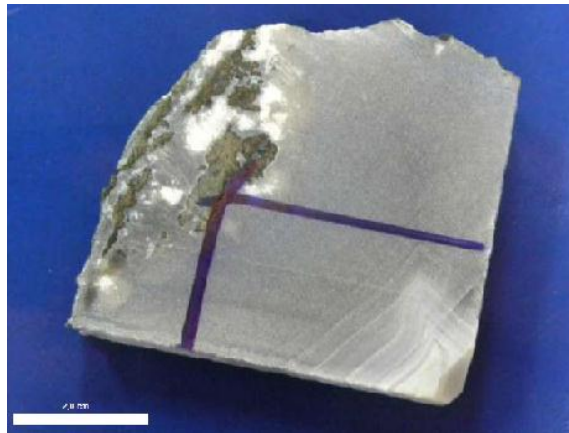
Figura 19 – Fotografia de fragmento do geodo analisado



(fonte: elaborada pelo autor)

A análise microscópica foi realizada em uma lâmina delgada, cuja localização na amostra é ilustrada por traços azuis conforme mostra a figura 20.

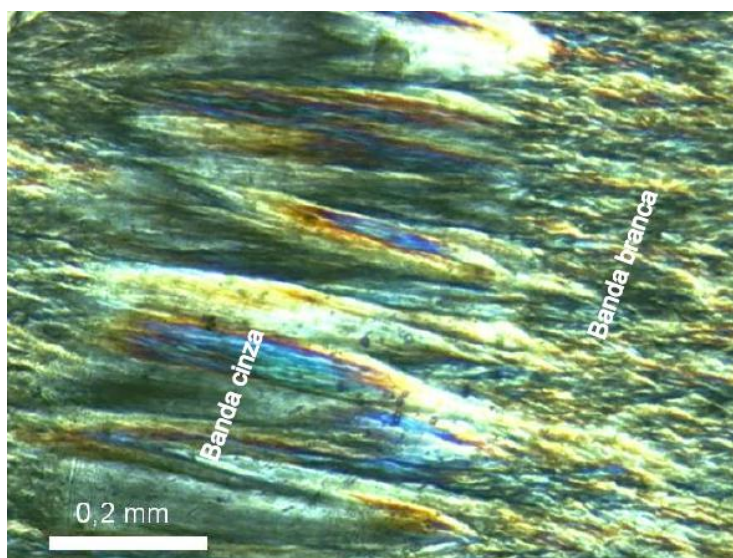
Figura 20 – Área para análise microscópica



(fonte: elaborada pelo autor)

A amostra de ágata analisada, apresentada na figura 21, é constituída por quartzo criptocristalino que forma agregados fibrosos orientados perpendicularmente à superfície de crescimento. O tamanho e a densidade das fibras são diferentes nas bandas claras (brancas) e escuras (cinza), sendo que nas bandas claras, as fibras são mais curtas (próximas de 0,05 mm) e delgadas com menor porosidade.

Figuras 21 – Agregados fibrosos do quartzo

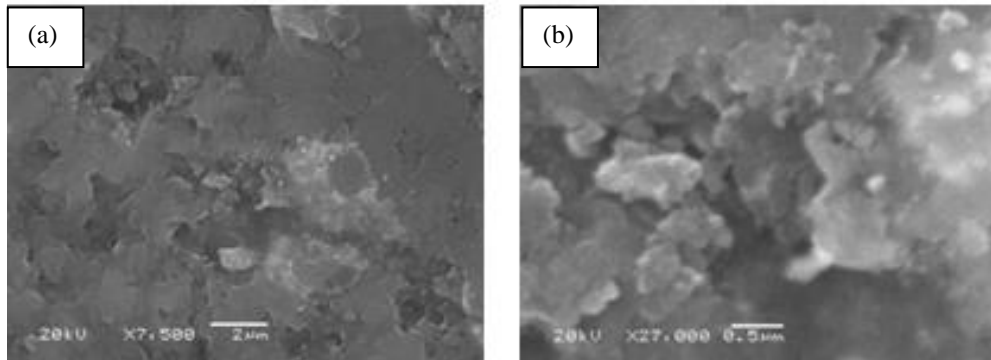


(fonte: elaborada pelo autor)

Em imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV), geradas a partir de elétrons secundários, revela forte diferença no tamanho e na densidade dos cristais de quartzo das bandas intercaladas na ágata. Nas bandas claras, os cristais formam uma massa indivisa densa, com os maiores indivíduos medindo menos que $0,1 \mu\text{m}$, enquanto que nas bandas cinza, o tamanho dos cristais alcançam mais do que $1,0 \mu\text{m}$. O significativo volume de vazios pode ser visto claramente na figura 22, que apresenta a banda cinza com aumento de 7.500 vezes (a). Com o aumento muitos cristais podem ser visualizados, assim como o grande volume de vazios, que confere maior porosidade à ágata. Ainda na figura 18 a imagem é obtida na mesma banda cinza, mas com aumento de 27.000 vezes (b). Nesta os cristais têm tamanhos de $0,5 \text{ mm}$ ou mais, e o volume de vazios mostra ser bem expressivo. Cabe destacar que o tamanho das fibras observado ao microscópio ótico não corresponde ao tamanho dos cristais, os quais são de 500 a 1000 vezes menores. A amostra de ágata analisada constitui um geodo preenchido por ágata e quartzo, este com menos de 10% do volume e restrito à porção central. Assim como na observação em microscópio ótico, em microscopia eletrônica a ágata apresenta zonas sem bandamento ou com bandamento incipiente, predominantemente de cor cinza e com textura fibrosa. Zona com bandamento bem definido, marcado pela intercalação de bandas cinza e brancas, ocorre na porção interna do geodo, contornando o quartzo macrocristalino. Tanto as fibras, que são constituídas por agregados de criptocristais iso-orientados, quanto os criptocristais individuais apresentam dimensões superiores na ágata

cinza quando comparados com ágata branca. A ágata cinza possui, ainda, maior porosidade que a ágata branca.

Figura 22 – Imagem do microscópio eletrônico de varredura: (a) com aumento de 7500 vezes e (b) com aumento de 27.000 vezes



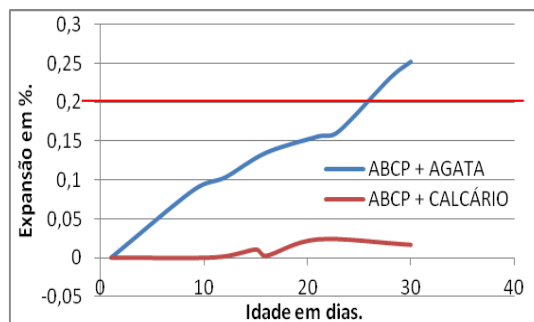
(fonte: elaborada pelo autor)

Por fim, pode-se dizer que a análise petrográfica realizada neste trabalho evidencia a potencialidade reativa do agregado reciclado de ágata.

7.1.2 ENSAIO ACELERADO DAS BARRAS DE ARGAMASSA

O gráfico 6 mostra as expansões obtidas para o agregado reciclado de ágata e o calcário, quando empregado o cimento padrão ABCP. Nas barras moldadas com o cimento padrão ABCP, o agregado miúdo reciclado de ágata mostrou um comportamento potencialmente reativo de grau 1 (quadro 6), frente à reação gerada, ou seja, o agregado reciclado de ágata é potencialmente reativo. Portanto, para empregá-lo é necessário o estudo de adições que inibam a ocorrência de RAA.

Gráfico 6 – Comportamentos de diferentes reações do cimento ABCP + ágata e do cimento ABCP + calcário em mesma solução alcalina

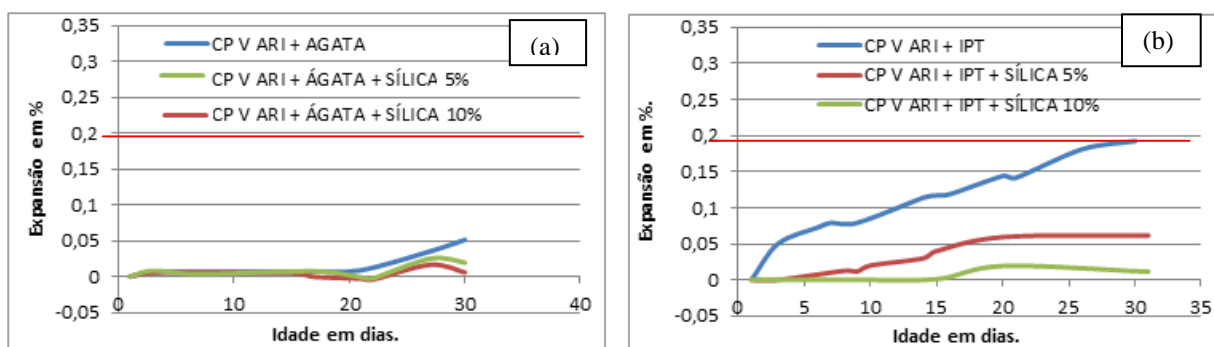


(fonte: elaborada pelo autor)

O agregado calcário promove a ocorrência da reação do tipo álcali-carbonato. Embora esta reação seja pouco conhecida, segundo a revisão da literatura, não gera, como a reação álcali-sílica, o gel expansivo. O ensaio acelerado efetuado não é adequado para caracterizar a reação álcali-carbonato, foi realizado somente no intuito de apresentar como seria o seu comportamento nas mesmas condições em que as barras de argamassa eram expostas. O comportamento do cimento padrão ABCP com o calcário, aos 30 dias, mostrou uma variação dimensional inferior a 0,03%.

A combinação apenas do CP V-ARI RS com o agregado de ágata mostrou-se bastante eficiente na mitigação das expansões decorrentes da RAA. Observa-se no gráfico da figura 7 que a mistura CP V-ARI RS e o agregado reciclado de ágata é suficiente para que as expansões do ensaio acelerado sejam consideradas de um agregado inócuo, ou seja, as adições ensaiadas nem seriam necessárias, pois como foi mencionado o CP V-ARI/RS possui até 34% de adições em sua composição. De qualquer forma, a adição de 5 e 10% de sílica ativa reduziram ainda mais as expansões.

Gráfico 7 – Combinação do (a) CP V-ARI/RS + ÁGATA com e sem adições e (b) CP V-ARI/RS com a areia do IPT com e sem adições



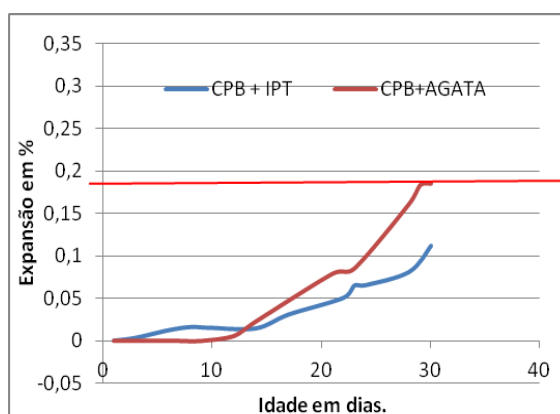
(fonte: elaborada pelo autor)

Efetuada uma comparação entre os resultados obtidos com CP V-ARI RS ora com agregado de ágata, ora com agregado de areia do IPT, verifica-se que a areia do IPT, conhecida por ser um agregado potencialmente inócuo, produziu expansões superiores às obtidas com a ágata. Como não foi realizado o ensaio entre areia do IPT e o cimento padrão ABCP, não há como avaliar se seu comportamento é potencialmente inócuo (a classificação da reatividade de um agregado só pode ser feita frente ao cimento padrão ABCP). O ensaio não foi realizado justamente pelo fato de a areia do IPT ser uma referência de agregado inócuo já bastante conhecido. Outro fator também é a necessidade de se conhecer como ocorrem as reações das

adições contidas no CP V-ARI/RS com os minerais constituintes do resíduo de ágata. Sendo assim, salienta-se a necessidade de realização destes ensaios para que se possam fazer avaliações mais completas.

Paralelamente traçando um comparativo do ensaio entre a areia do IPT e o resíduo de ágata em combinação com o mesmo cimento Portland branco (gráfico 8), verificou-se um comportamento bastante similar entre os dois, ainda que o resíduo de ágata tenha atingido maiores valores de expansão. Conforme Norma, estes agregados tiveram comportamentos inócuos para uma imersão com 28 dias de duração.

Gráfico 8 – Comparativo da combinação do CPB ora com areia do+ IPT, ora com reciclado de ágata

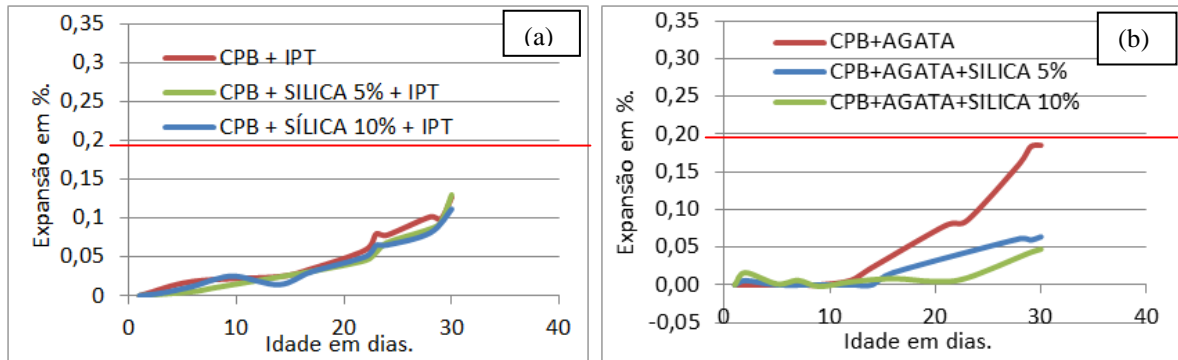


(fonte: elaborada pelo autor)

Mesmo tendo apresentado comportamento inócuo com cimento branco, as expansões do agregado reciclado de ágata foram muito próximas do limite considerado potencialmente reativo, por isso, no gráfico 9 aprecia-se o comportamento do agregado reciclado de ágata e da areia do IPT com o cimento branco em comparação com a substituição de 5 e 10% deste cimento por sílica ativa.

Observando-se o gráfico 9 verifica-se que as expansões decorrentes da reação entre a areia do IPT e o cimento branco não são satisfatoriamente mitigadas quando se emprega 5 ou 10% de sílica ativa, ou seja, não havendo uma redução significativa para nenhuma das duas porcentagens.

Gráfico 9 – Comparativo do (a) CPB com areia do IPT e adições de sílica e (b) CPB com ágata e adições de sílica



(fonte: elaborada pelo autor)

Raciocínio análogo foi feito para comparar o mesmo cimento em combinação com o resíduo miúdo reciclado de ágata, cuja redução das expansões foi de 62,5% quando empregados os 5% de sílica ativa e 73,1% quando empregados 10% de adição.

Sendo assim, no caso do agregado reciclado de ágata, o percentual de 5% de adição de sílica ativa já se mostrou bastante eficiente, sendo que como melhor resultado a adição de 10% apresentou-se reduzindo ainda mais a mitigação das reações do cimento branco com o agregado reciclado de ágata.

8. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo da viabilidade de emprego do agregado reciclado de ágata em concretos de cimento Portland branco, no que diz respeito à sua potencialidade reativa. Para tal, foram utilizados dois tipos de cimentos comerciais, um branco e um cinza, comparando seus resultados com um cimento padrão específico para o ensaio normalizado. Além dos agregados reciclados também foram avaliados comparativamente os resultados de misturas com areia de origem calcária e areia padrão do IPT. Também, foram testadas formas de mitigação da reação com adição mineral (sílica ativa). Juntamente aos estudos de durabilidade, foram avaliadas a forma e as características do resíduo durante a sua britagem. Os resultados foram analisados com base no que preconiza a norma NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c), para agregados potencialmente reativos.

As conclusões apresentadas a seguir, apesar de estarem em consonância com a maior parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de misturas que utilizaram tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

O estudo realizado, no que diz respeito à sua potencialidade reativa do agregado reciclado de ágata, mostrou que o mesmo é potencialmente reativo aos hidróxidos alcalinos do cimento Portland branco, quando analisado através do ensaio acelerado das barras de argamassa.

Contudo, as análises realizadas entre a mistura de agregado reciclado de ágata e o cimento CP V-ARI/RS evidenciaram que o percentual de adições presentes neste cimento já são suficientes para que as expansões deletérias sejam mitigadas, mostrando que o emprego de sílica ativa, no caso do uso de CP V-ARI/RS, mostrou-se dispensável.

Por outro lado, o uso de sílica ativa promoveu redução significativa no potencial de expansão quando a mistura analisada foi: agregado reciclado de ágata e cimento branco. Teores mínimos de adição mostraram-se eficientes, uma vez que o emprego de 5% de adição resultou

em redução de 62,5% nas expansões, e de 73,1% a redução para um acréscimo de 10% de sílica ativa.

Sendo assim, pode-se concluir que quando o agregado reciclado de ágata for empregado em concretos com cimento Portland branco é importante, mas não obrigatória, que se utilizem adições mitigadoras da reação álcali-agregado, já que conforme Norma referida para este ensaio, classifica a ação como mínima a ser tomada para a prevenção do processo evolutivo da reação.

Um fator importante a ser observado na possível utilização desde agregado miúdo reciclado de ágata é a dificuldade em britá-lo. Sua dureza ocasiona grande desgaste, provocando contaminação com lascas e pó de ferro originadas das mandíbulas do britador. Como resultado tem-se um agregado com coloração alterada, o que poderia ser de cor muito clara, quase branca, com a contaminação adquire várias tonalidades diferentes a cada britagem, impedindo sua padronização. Acrescido ao inconveniente citado, é que em contato com água, mesmo em uma simples lavagem de material, o agregado aparentemente sofre processo de oxidação causado pelo pó de ferro nele contido.

Como visto na literatura, pastas constituídas de agregados com formas mais arredondadas conferem melhor empacotamento no agregado graúdo. Assim no caso do agregado reciclado de ágata na granulometria conseguida, com o britador de mandíbulas, obteve-se um grão com aparência extremamente lamelar, que tornaria mais dificultada sua utilização em concretos.

Também, ao final deste trabalho é importante salientar que, para a interpretação dos resultados destaca-se a necessidade de ensaios que não foram realizados neste estudo, tais como: análise mecânica do cimento CP V-ARI RS, análise de outros tipos de adições e análise da reatividade da areia do IPT com o cimento padrão ABCP, uma vez que, neste estudo, esta areia não apresentou o mesmo comportamento descrito na literatura (agregado de referência inócua).

REFERÊNCIAS

ANDRADE, W. P. **Concretos massa estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ANDRIOLO, F. R. Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1997. p. 1 – 24.

ANDRIOLO, F. R. Agregado Deletério:- possibilidades seguras de uso. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12989**: cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 12655**: concreto: preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15577- 1**: agregados – reação álcali-agregado. Parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR 15577- 3**: agregados – reação álcali-agregado. Parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 15577- 4**: agregados – reação álcali-agregado. Parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008c.

_____. **NBR 15577- 5**: agregados – reação álcali-agregado. Parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008d.

BENITEZ, A.; BALZAMO, H.; MIGOYA, E. Estudio de hormigones convencionales elaborados con cemento gris y cemento blanco utilizando un aditivo de doble efecto. In: JORNADAS DE DESARROLLO E INNOVACIÓN, 4., 2002. Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires, [s.n.], 2002. p. 1-2.

BETAT, E. F. **Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: avaliação da resistência à compressão**. 2006. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação de Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2006.

BRANCO, P.; VIERO, 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: <<http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/04/index.htm>>. Acesso em: 12 jun. 2011.

CIUDAD DE LAS ARTES Y DE LA CIENCIA, [foto da galeria fotográfica]. [Valencia], 2012. Disponível em: <<http://www.cac.es/prensa/galeria>> Acesso em: 14 jun. 2012.

CORDEIRO, L. N. P. **Avaliação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

COSTA, M. **Beneficiamento de Pedras Preciosas no Vale do Taquari**: diagnóstico e modelo para análise e redução de perdas nos processos produtivos. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FUNDAÇÃO IBERÊ CAMARGO, [foto do museu Iberê Camargo]. [Porto Alegre], 2008. Disponível em: <http://www.iberecamargo.org.br/content/museu/construcao.asp?que_pagina=1> Acesso em: 14 jun. 2011.

GIGUER, R. **Análise da utilização de resíduo epóxi pigmentado na substituição do filer calcário em concretos cromáticos**. 2009. 68 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **Manual Técnico de Gemas**. 4. ed. rev. e atual. Brasília: IBGM, DNPM, 2009.

IPAR, C. E. A. L. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <sximeno@uol.com.br> em 7 jun. 2010.

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 DESING 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.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural**: avaliação da carbonatação e absorção capilar. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Concreto Branco. In: ISAIA, G. C. (editor). **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1453–1491. v. 2.

KIRCHHEIM, A. P.; SOMMER, L.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo da absorção capilar em argamassas de cimento Portland branco estrutural com diferentes teores de adições pozolânicas. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., São Paulo, 2004. **Anais...**, São Paulo: ENTAC, 2004.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, E. M.; PINFARE, J. C.; CARNEIRO, E. F. Detecção da reação álcali-agregado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: CBDB, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de escoria granulada de fundição em blocos de concreto para pavimentação**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. 2004. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PASSUELO, A.; PASSUELLO, A. C.; SILVA FILHO, L. C. P.; CAMPAGNOLO, J. L. Análise da resistência e módulo de deformação de concretos à base de cimento branco. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL. 31., 2004, Mendoza, Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, 2004.

PAULON, V. A. **Reação álcali-agregado em concreto**. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PIOVESAN, A. Z. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PRISZKULNIK, S. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado. In: ISAIA, G. C. (editor) **Concreto**: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1017-1070. v. 2.

SILVA, C. F. C. Análise de Métodos de Prevenção da Reação Álcali-agregado: análise petrográfica e método acelerado de barras de argamassa., 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

SIQUEIRA, H. C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento de Portland branco e escoria de alto forno, ativados quimicamente.** 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

STRIEDER, A. J. Base metodológica da pesquisa mineral nos garimpos de pedras preciosas do estado do Rio Grande do Sul. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO EM ÁREAS DE GARIMPO DE PEDRAS PRECIOSAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2005, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005, p. 1-19. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/modelage/html/t_15.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2011.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado:** avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado. 2006. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.