

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA CIVIL

AMANDA CRISTINA BENETON  
ANDRÉ BARBOSA CINTRA  
LUCAS ANTONIO DOS ANJOS CARVALHO  
MIGUEL ROLDAN ANTUNES

CONCRETO DE PÓS REATIVOS ECOEFICIENTE

São Paulo

2014

AMANDA CRISTINA BENETON  
ANDRÉ BARBOSA CINTRA  
LUCAS ANTONIO DOS ANJOS CARVALHO  
MIGUEL ROLDAN ANTUNES

CONCRETO DE PÓS REATIVOS ECOEFICIENTE

Trabalho de Graduação Interdisciplinar  
apresentado ao curso de Engenharia Civil da  
Escola de Engenharia da Universidade  
Presbiteriana Mackenzie, como requisito  
parcial para a obtenção do Título de  
Engenheiro.

ORIENTADOR: PROF. ME. SIMÃO PRISZKULNIK

São Paulo

2014

Às nossas famílias e nossos companheiros pelo apoio, e a todas as pessoas dispostas a inovar e contribuir para o bem estar da sociedade.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradecemos a Deus, por nos ter dado, saúde, força e coragem para encarar esta longa jornada em busca de conhecimento.

A nosso orientador e companheiro Prof. Me. Simão Prizskulnik, que nos deu a oportunidade de pesquisa e acreditou nos objetivos deste trabalho, nos levando a resultados gratificantes e que excederam nossas expectativas.

A nossos pais, mães, e demais parentes pelo incentivo, contribuição e carinho em todos os momentos, desde os de felicidade até os de angústia. Os familiares são nossos pilares e fundações mais fortes, com os quais sempre pudemos contar, e com isso crescer e chegar onde estamos.

Aos amigos e companheiros que nos apoiaram do começo ao fim deste trabalho. Seu apoio, suas sugestões e também sua compreensão em nossos períodos de ausência foram pontos importantíssimos para o sucesso de nossa pesquisa.

À Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, com um ambiente sempre acolhedor e que abriu nossos olhos através dos mais variados conteúdos, tão importantes para nosso presente e futuro como engenheiros.

Aos técnicos Lázaro de Castro, José Maria da Silva e José Carlos Sobrinho, pela orientação e apoio inestimáveis durante todos os nossos ensaios no Laboratório de Materiais e que permitiram materializar nossas ideias em busca da inovação.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e às empresas Holcim, MC Bauchemie, Maccaferri, Tecnosil, Beneficiamento de Minérios Rio Claro e PhD Engenharia pelo tempo e apoio prestados, sem os quais este trabalho não teria sido realizado. Através dos conhecimentos transmitidos e do material cedido, foi possível aprender muito mais do que esperávamos no campo de Tecnologia do Concreto, o que nos estimula a contribuir ainda mais com nossas pesquisas futuramente.

Aos grandes profissionais Dr. Holger Schmidt, Prof. Dr. Paulo Helene, Dr. Carlos Britez, Eng. Mariana Carvalho, Eng. Douglas Couto e Eng. Pedro Bilesky, pelas longas conversas, pelo apoio e presença tanto na pesquisa teórica quanto na parte experimental, que nos conduziram ao longo da investigação sobre um tema relativamente recente e carente de pesquisas e normas. Os resultados aqui divulgados são resultado de cada uma das palavras trocadas e representam nosso muito obrigado.

“Eu gosto do impossível porque lá a concorrência é menor.”

(Walt Disney)

## RESUMO

Este trabalho apresenta a proposta de uma nova concepção para dosagens envolvendo concreto de pós reativos (CPR), que vem sendo estudado nos últimos anos, mas ainda encontra problemas para disseminação no meio técnico brasileiro devido ao complexo processo de produção e elevado consumo de aglomerantes, em torno de 1000 kg/m<sup>3</sup>. Este concreto de última geração caracteriza-se pela ausência de agregados graúdos, utilização de partículas com diâmetro máximo de 2 mm, ausência de vazios na matriz e resistência à compressão comumente em torno de 150 MPa, podendo chegar a 800 MPa. Seu desempenho mecânico permite grande redução de seções transversais e economia de recursos naturais, gerando menor impacto ao meio ambiente, entretanto, procurar-se-á uma maior redução das emissões de carbono desse concreto, mantendo sua resistência e durabilidade. Atendendo a Classe de Agressividade Ambiental mais exigente da ABNT NBR 6118:2014, foram estudados traços de concretos de pós reativos com baixo teor de aglomerantes, misturados e curados de forma convencional. Através do estudo de empacotamento de partículas e de compatibilidade dos materiais utilizados, pôde-se obter concretos com resistências acima de 140 MPa com índice de vazios de 1,5%, evidenciando a possibilidade da diminuição do consumo de cimento e também de sua produção simplificada para aplicação em projetos de diferentes finalidades.

Palavras-chave: Concreto de pós reativos. Concreto. Ultra alta resistência. Ecoeficiente.

## **ABSTRACT**

This paper addresses the proposal of a new conception for Reactive Powder Concretes, which have been investigated in the last few years but still lack dissemination in the Brazilian technical community due to its complex production process and its high binder content, around 1000 kg/m<sup>3</sup>. This special concrete has no coarse aggregates, presents maximum particle size of 2 mm and has compressive strength commonly around 150 MPa, reaching up to 800 MPa. Its mechanical performance enable a reduction of cross sections and economy of raw materials leading to lower environmental impact, nonetheless, a greater reduction of the carbon footprint will take place, maintaining concrete's high resistance and its durability. Meeting requirements of the most severe environmental class of ABNT NBR 6118:2014, Reactive Powder Concrete mix designs with low binder content were investigated, being cast and cured as conventional concrete. After studies of particle packing and compatibility of used materials, it was possible to obtain concrete compressive strength above 140 MPa and void index of 1,5 %, indicating the possibility of cement content reduction and simplified manufacturing for application in different projects.

**Key-words:** Reactive powder concrete. Concrete. Ultra high performance. Ecoefficient.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Seções de peças de CPR, aço, concreto armado e protendido, para a mesma capacidade portante (WALRAVEN, 2000 <i>apud</i> HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011) .....	14
Gráfico 1	Curva Tensão x Deformação para CPR200 sob compressão simples (DUGAT, 1995 <i>apud</i> VANDERLEI, 2004) .....	15
Fotografia 1	Ponto de ônibus feitos com chapa de CPR em Shawnessy, Canadá. (BEHLOUL; ACKER, 2004).....	16
Fotografia 2	Passarela de Seonyu na Coreia do Sul (HELENE; ISAIA;TUTIKIAN,2011). 16	
Fotografia 3	Aplicação de painéis pré-moldados no estádio Jean Bouin na França (LAFARGE, 2014) .....	17
Fotografia 4	Aplicação de CPR <i>in loco</i> em elementos de flexão (GRAYBEAL, 2011).....	26
Fotografia 5	Aplicação de CPR <i>in loco</i> em juntas de pontes (GRAYBEAL, 2011).....	27
Fotografia 6	Transporte de lajes de CPR pré-moldadas nervuradas e pré-tracionadas para expansão do aeroporto de Haneda (BEHLOUL; BATOZ, 2009).....	27
Gráfico 2	Curvas real (em azul) e teórica (em vermelho) dos materiais secos para estimativa virtual do proporcionamento ideal do CPR, com auxílio do <i>software</i> EMMA (ELKEM AS, 2012).....	38
Fotografia 7	Separação dos materiais para mistura (acervo pessoal, 2014).....	42
Fotografia 8	Mistura dos materiais em argamassadeira (acervo pessoal, 2014) .....	42
Fotografia 9	Moldagem de CPs de 5cm x 10cm (acervo pessoal, 2014) .....	43
Fotografia 10	Armazenamento de CPs moldados em câmara úmida (acervo pessoal, 2014). 43	
Fotografia 11	Retirada do molde de tronco de cone para realização de ensaio de espalhamento sobre mesa de consistência. (acervo pessoal, 2014) .....	44
Fotografia 12	Medição com paquímetro do espalhamento ( <i>flow table</i> ) dos traços propostos de CPR (acervo pessoal, 2014).....	44
Fotografia 13	Corpo de prova sendo preparado para ensaio de resistência à compressão (acervo pessoal, 2014) .....	45
Fotografia 14	Detalhe dos corpos-de-prova após ruptura cisalhada (acervo pessoal, 2014) ..	46
Fotografia 15	Leitura dos valores de ruptura em $t_f$ (acervo pessoal, 2014).....	46
Fotografia 16	Balança hidrostática utilizada para pesagem da amostra imersa em água (acervo pessoal, 2014) .....	47

Gráfico 3	Crescimento da resistência à compressão de CPR ecoeficiente (elaboração própria, 2014).....	49
Gráfico 4	Comparativo de rendimento de CPRs em relação ao consumo de cimento (elaboração própria, 2014).....	51
Gráfico 5	Rendimento dos CPRs propostos em relação ao consumo de cimento (elaboração própria, 2014).....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Concreto de Pós Reativos <i>versus</i> Concreto de Alto Desempenho .....	13
Tabela 2	Composições típicas de CPRs disponíveis na literatura .....	28
Tabela 3	Características do Ductal® – FM Gris formulação 3GM2.0 .....	28
Tabela 4	Quantidade de materiais e energia necessária para construção de estrutura treliçada de concreto convencional e concreto de ultra alto desempenho .....	32
Tabela 5	Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	35
Tabela 6	Ensaio de compatibilidade de aditivos .....	39
Tabela 7	Traços propostos de CPR ecoeficiente .....	40
Tabela 8	Resistência à compressão a 7 dias .....	48
Tabela 9	Resistência à compressão a 28 dias .....	48
Tabela 10	Resistência à compressão a 63 dias .....	49
Tabela 11	Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm de CPRs moldados sem fibras (valores em MPa) .....	50
Tabela 12	Comparativo de rendimento a 28 dias de CPRs relativo ao consumo de cimento .	50
Tabela 13	Índice de consistência dos traços de concreto estudados.....	52
Tabela 14	Resultados de absorção de água e índice de vazios aos 28 dias (ABNT NBR 9778:2009).....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CP I	Cimento Portland Comum
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPR	Concreto de Pós Reativos
CP	Corpo-de-prova
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
DSP	Densificado com Partículas Pequenas
GPa	Giga Pascal
J/m <sup>2</sup>	Joule por metro quadrado
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
MDF	Isento de Macro Defeitos
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
a/c	Água/Cimento
°C	Graus Celsius
a/agl	Relação Água/Aglomerantes
C <sub>cim</sub>	Consumo de Cimento
cm	Centímetro
µm	Micrômetro
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
m	Metro
mm	Milímetro
tf	Toneladas-Força
UHPFRC	<i>Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete</i>
ZT	Zona de transição

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	18
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	METODOLOGIA .....	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	22
2.1	CONCRETO OU ARGAMASSA DE PÓS REATIVOS? .....	22
2.2	MATERIAIS .....	22
2.2.1	<b>Cimento</b> .....	23
2.2.2	<b>Areia</b> .....	23
2.2.3	<b>Pó de quartzo</b> .....	23
2.2.4	<b>Superplastificantes</b> .....	24
2.2.5	<b>Sílica ativa</b> .....	24
2.2.6	<b>Fibras</b> .....	25
2.3	CONCRETO DE PÓS REATIVOS NA ATUALIDADE .....	26
2.4	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	29
2.5	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	30
2.6	DURABILIDADE.....	34
<b>3</b>	<b>ESTUDO EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	37
3.2	EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS .....	38
3.3	TESTES DE COMPATIBILIDADE DE ADITIVO.....	38
3.4	DOSAGEM DE CONCRETO .....	39
3.5	MISTURA, MOLDAGEM E CURA DO CPR.....	41
3.6	ENSAIO DE CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....	43
3.7	ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	45
3.8	ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO - DURABILIDADE .....	47
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	48

4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RENDIMENTO .....	48
4.2	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NA MESA DE FLUIDEZ .....	52
4.3	DURABILIDADE.....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante por soluções inovadoras envolvendo materiais de construção é estimulada pelo mercado visando melhorias relacionadas a desempenho, custos e prazos de execução. Muito tem sido pesquisado na área de tecnologia do concreto e, nos últimos anos, surgiram novas possibilidades que foram disponibilizadas às construtoras, de forma a atender demandas específicas de resistência, tempo de cura e desforma, trabalhabilidade e durabilidade. A evolução desses aspectos permitiu uma modificação na forma como são concebidos os projetos de estruturas de concreto, de pequeno ou grande porte, melhorando a qualidade e atuação em diversos nichos de mercado.

Na temática dos concretos de última geração, o Concreto de Pós Reativos (CPR) figura como o maior representante dos concretos de Ultra Alto Desempenho (CUAD) juntamente com os Isentos de Macro Defeitos (MDF) e os Densificados com Partículas Pequenas (DSP). O CPR é caracterizado pelo uso de cimento com adições minerais, baixa relação água/aglomerantes (por aglomerante entende-se a soma de cimento Portland e adições minerais), uso do pó de quartzo, agregados miúdos de pequeno diâmetro, fibras e aditivos superplastificantes. Isso permite atingir grandes resistências à compressão e à tração na flexão, exibindo propriedades mecânicas intermediárias entre os Concretos de Alto Desempenho (CAD) e as estruturas metálicas (DAURIAC, 1997 *apud* FÁVERO; TUTIKIAN, 2013), conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Concreto de Pós Reativos *versus* Concreto de Alto Desempenho.**

<b>Propriedade Mecânica</b>	<b>CAD</b>	<b>CPR</b>
Resistência à compressão (MPa)	60-100	180-200
Resistência à tração na flexão (MPa)	06-10	40-50
Energia de fratura (J/m <sup>2</sup> )	140	1200-40000
Módulo de Young (GPa)	23-37	50-60

(Fonte: adaptado de LEE; CHISHOLM, 2005)

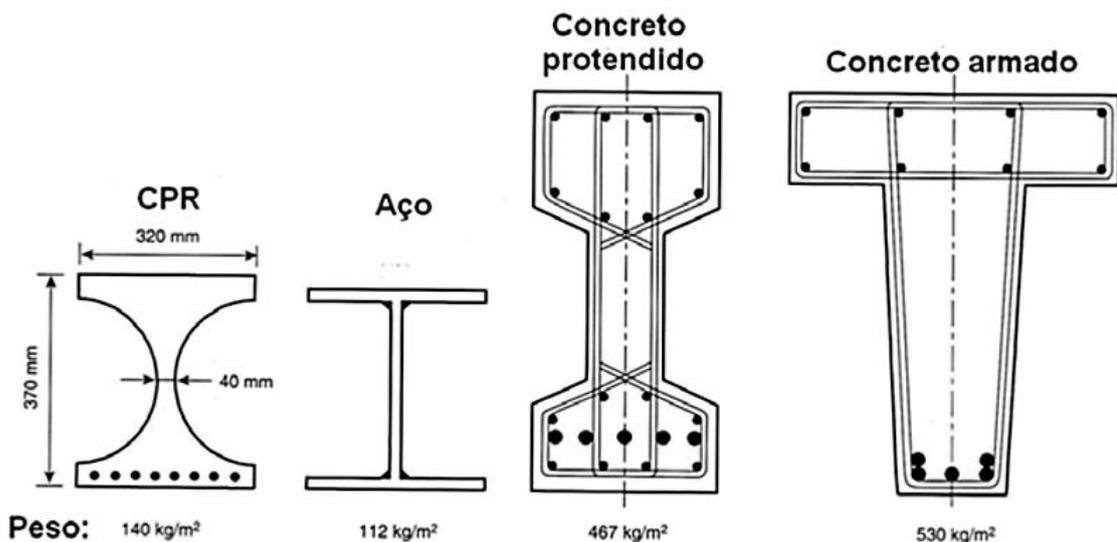
Segundo Helene, Isaia e Tutikian (2011), o CPR é derivado de pesquisas realizadas na França por Pierre Richards, ex-diretor científico da empresa francesa Bouygues, considerado o inventor desse tipo de concreto, em 1990, a partir do estudo de concreto de alto desempenho, desde 1982. Além disso, também houve contribuições na França, Canadá e Dinamarca por pesquisadores que estudaram e divulgaram os princípios para a produção dos

CPRs listados a seguir, conforme exposto por Richards e Cheyrezy (1995 *apud* ALLENA; NEWTSON, 2010):

- adição de fibras metálicas para aumento a ductilidade;
- aplicação de pressão na etapa de endurecimento, para melhor compactação;
- otimização da estrutura granular, visando aumento da compacidade;
- remoção do agregado graúdo, melhorando sua homogeneidade;
- tratamento térmico, melhorando as propriedades mecânicas da microestrutura;
- uso de sílica ativa para potencializar as reações pozolânicas.

As propriedades mecânicas citadas anteriormente na Tabela 1 viabilizam ao CPR grande redução de seções transversais nos projetos e, segundo Repette (2005), até a eventual remoção de armaduras passivas em casos específicos, devido à incorporação de fibras, conforme a Figura 1. Esse panorama possibilitou ao CPR tornar-se uma opção interessante para projetos de baixo impacto ambiental, seguindo o conceito preconizado por Helene<sup>1</sup>, afirmando que concretos mais resistentes são mais viáveis e sustentáveis.

**Figura 1 – Seções de peças de CPR, aço, concreto armado e protendido, para a mesma capacidade portante.**



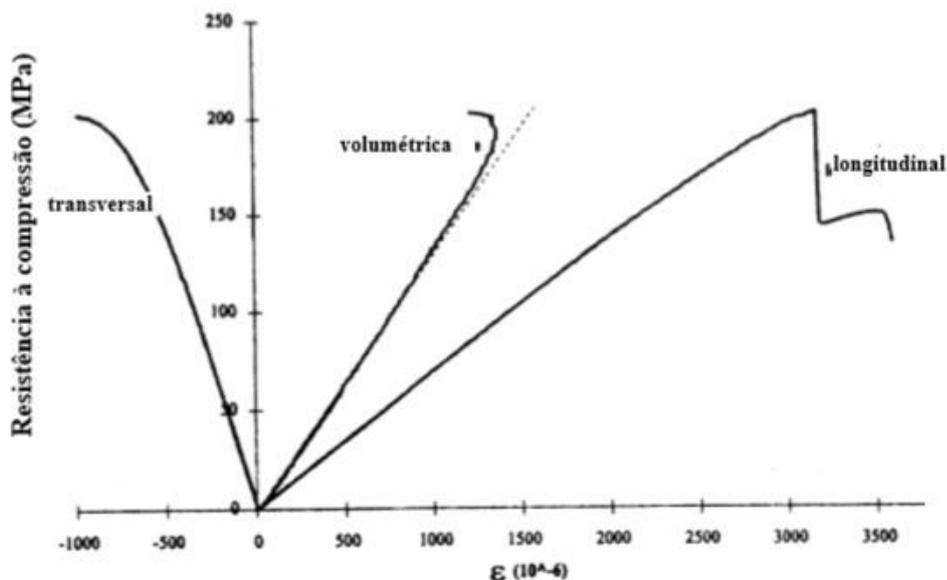
(Fonte: WALRAVEN, 2000 *apud* HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011)

<sup>1</sup> Conceito apresentado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene durante o Curso Master PEC de Sustentabilidade na Construção Civil, oferecido pelo IBRACON e SINDUSCON – SP, em 09 de setembro de 2013.

Outro ponto importante relacionado à economia no uso de recursos naturais é o baixo consumo de água característico dos CPR. Segundo Vanderlei (2004), a relação água/cimento (a/c) típica para o CPR é da ordem de 0,15, valor muito abaixo das quantidades utilizadas em obras correntes. Este aspecto contribui para o aumento de resistência do concreto, conforme a conhecida Lei de Abrams, por outro lado, Neville (2006) afirma que, para tal quantidade de pasta, é impossível hidratar todas as partículas de cimento de forma a se obter gel aglomerante. Assim, o desempenho do CPR só se torna possível devido ao uso de aditivos superplastificantes e através de uma granulometria adequada, garantindo a trabalhabilidade necessária para mistura e moldagem satisfatórias.

Sendo muito resistente e, quando da utilização de fibras, muito dúctil, o CPR apresenta um comportamento diferente do concreto convencional, com curvas de tensão-deformação específicas, mas ainda carentes de estudos aprofundados (GRAYBEAL; RUSSELL, 2013). Este comportamento pode ser uma solução inovadora para questões de projeto envolvendo peças esbeltas ou até para modificar a robustez das estruturas. O Gráfico 1 demonstra a deformação do CPR sob carregamentos axiais de compressão, evidenciando um material com ruptura frágil, porém de comportamento predominantemente linear.

**Gráfico 1 – Curva Tensão x Deformação para CPR200 sob compressão simples.**



(Fonte: DUGAT, 1995 *apud* VANDERLEI, 2004)

Para obter tal desempenho, o CPR atualmente disponível no mercado internacional possui consumo elevado de aglomerantes, requer estudo detalhado de granulometrias, compactação e também cura térmica para sua produção. Sendo muito sensível

à variação de materiais e métodos de produção, as versões disponíveis deste concreto são todas patenteadas por empresas, o que se justifica pelos estudos experimentais complexos e de elevado custo. Desse modo, segundo Tang (2004), para disseminar a utilização de concretos de ultra alto desempenho, em especial o CPR, serão necessários avanços em pesquisas para aplicações mais convencionais.

Como tecnologia emergente, o CPR é muito versátil e pode ser usado para estruturas com fins militares, proteção contra radiação, obras de arte, estruturas protendidas, revestimento de fachadas e peças de concepções arquitetônicas complexas (TANG, 2004). Têm-se casos de sucesso implantados e já muito divulgados, como as passarelas de Sherbrooke no Canadá e Sakata Mirai no Japão, além de painéis de concreto, utilizados em estações de metrô em Mônaco (BEHLOUL; ACKER, 2004). Além destes, outros usos são destacados, como a fabricação de blocos para proteção de encostas, fabricação de móveis e de equipamentos públicos (pontos de ônibus, por exemplo). Alguns destes casos são ilustrados nas fotografias 1, 2 e 3.

**Fotografia 1 – Ponto de ônibus feitos com chapa de CPR em Shawnessy, Canadá.**



(Fonte: BEHLOUL; ACKER, 2004)

**Fotografia 2 – Passarela de Seonyu na Coreia do Sul.**



(Fonte: HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011)

**Fotografia 3 – Aplicação de painéis pré-moldados no estádio Jean Bouin na França.**



(Fonte: LAFARGE, 2014)

Com os exemplos existentes e outros tantos projetos a serem implantados, este concreto vem sendo difundido cada vez mais em obras nos Estados Unidos, Canadá, Itália, Coréia do Sul e Malásia, por exemplo. A Europa, em especial Alemanha e França, apresentam grandes centros de pesquisa em parceria com empresas e também em universidades, que levaram à construção de pontes, passarelas e também aplicação de reparos superficiais em obras existentes (Graybeal e Russell, 2013). Entretanto, para Helene, Isaia e Tutikian (2011), o CPR ainda é uma tecnologia inacessível à grande maioria das empresas devido ao controle tecnológico necessário e às técnicas envolvendo cura do material com grandes pressões e elevadas temperaturas. Estas técnicas podem ser desenvolvidas pela emergente indústria brasileira de pré-moldados ou, na inviabilidade de processos industrializados, através de mudanças no padrão de produção do concreto.

Diante de todo cenário exposto nesta parte introdutória, este trabalho busca estudar a dosagem de um CPR modificado, através de um estudo de empacotamento partículas, e sem a utilização de processos de compactação e cura térmica, com vistas a cumprir com a ousada missão de possibilitar a quebra de barreiras do uso deste material versátil, popularizando o mesmo no meio técnico nacional.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Contribuir para a concepção de um estudo de dosagem experimental de concreto de pós reativos ecoeficiente com consumo reduzido de aglomerantes e simplificação do método de produção.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Colaborar com a avaliação da viabilidade da dosagem de concretos de pós reativos ecoeficientes utilizando métodos de cura convencionais, com o intuito de obter concretos de ultra alto desempenho.

Investigar características necessárias de distribuição granulométrica para empacotamento de partículas.

Comparar características relacionadas à durabilidade e propriedades mecânicas dos concretos estudados com concretos similares disponíveis na literatura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Para Tang (2004), a popularidade de um material é afetada diretamente pelo seu custo. Para disseminar sua utilização, a pesquisa sobre concretos de ultra alto desempenho (em especial, o CPR) necessita de avanços para seu uso em aplicações mais populares e convencionais, assim como ocorreu em meados de 1856, quando Heney Bessemer inovou o processamento do aço e permitiu sua fabricação em grandes quantidades e a preços acessíveis para o mercado da construção.

As investigações deste trabalho possuem o mesmo princípio, estudando as diferentes misturas e métodos simplificados de produção para um CPR ecoeficiente, já muito resistente e sustentável, mas com possibilidades reais de exequibilidade e aplicabilidade.

Nesse contexto, uma das propostas deste trabalho é a manutenção das propriedades de alta resistência e durabilidade dos CPRs, porém evitando o uso de cura a vapor e compactação. Richards e Cheyrezy (1995 *apud* LEE; CHISHOLM, 2005) expuseram a importância do aumento da temperatura para obtenção de altas resistências juntamente com a diminuição do teor de vazios na compactação; entretanto, um estudo utilizando métodos

convencionais pode contribuir economicamente para otimizar o processo produtivo. Comparado com o método atual de pré-fabricação do CPR, métodos simplificados podem resultar em menores gastos de energia e combustível, emissões de carbono, e também se tornar um diferencial no mercado da construção, que valoriza cada vez mais a sustentabilidade.

Em termos de sustentabilidade, apesar da indústria de cimento já ser uma das mais sustentáveis do mundo<sup>2</sup>, uma redução do consumo de aglomerantes por metro cúbico nos concretos implicaria em ganhos ambientais e econômicos imediatos e mensuráveis. A medida é interessante comercialmente, e se soma ao fato da ecoeficiência ser cada vez mais imperativa, considerando que, caso mantida a tendência atual da cadeia produtiva, a indústria cimenteira deve se tornar responsável por 30% das emissões totais de CO<sub>2</sub> em 2050 (DAMINELI *et al.*, 2013). A redução do consumo de aglomerantes do CPR contribui diretamente para atenuar esse impacto ambiental com o aumento da demanda mundial de concreto.

Ao reduzir o teor de materiais cimentícios, o grande desafio de execução dos concretos ecoeficientes é manter a sua trabalhabilidade, mesmo com a diminuição do volume de pasta de cimento, que torna o concreto muito seco, antes mesmo de endurecer. Para tanto, a investigação de um CPR fluido, mesmo com baixos volumes de pasta de cimento, torna-se interessante para aplicação em diversas obras, dispensando técnicas de compactação de concretos secos, nem sempre acessíveis. Além disso, existem CPRs no mercado com grande trabalhabilidade, e manter tais propriedades possibilitam ganhos de produção importantes, muitos deles geralmente associados a concretos autoadensáveis (CAA). Conforme Neville e Brooks (2013), alguns deles são ausência de ruídos, ausência de vibradores, ciclos de concretagens mais rápidos e redução do número de operários. Deste modo, é importante o adequado estudo da reologia e manutenção da trabalhabilidade destes concretos, mesmo com quantidade de ligantes reduzida, aumentando o rendimento do produto.

Finalmente, diante do cenário apresentado, este trabalho se justifica em virtude da necessidade de estudo mais aprofundado sobre o CPR com menor consumo de aglomerantes, opções de materiais utilizados e suas combinações, além da investigação de propriedades no estado fresco para as etapas de produção, transporte, lançamento e adensamento, de forma a analisar outras possibilidades de produção para este concreto

---

<sup>2</sup> Conceito apresentado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene durante o Curso Master PEC de Sustentabilidade na Construção Civil, oferecido pelo IBRACON e SINDUSCON - SP em 09 de setembro de 2013.

especial e sua inserção no mercado, mais simplificada à indústria de pré-fabricados e também possibilitando aplicações *in loco*.

### 1.3 METODOLOGIA

Este trabalho envolveu revisão bibliográfica e trabalho prático.

A revisão bibliográfica sobre Concreto de Pós Reativos abrangeu seus materiais componentes e métodos para sua aplicação. Também se procedeu com uma discussão sobre concretos sustentáveis, em especial sobre o aspecto dos baixos consumos de aglomerantes estudados nos CPRs.

O trabalho prático foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie, através da dosagem e moldagem de corpos-de-prova, utilizando métodos de cura empregados nos concretos convencionais, conforme ABNT NBR 5738:2008. Foram investigadas as consequências na redução do consumo de cimento, analisando as propriedades mecânicas e de durabilidade obtidas neste concreto.

Além disso, foi realizado o estudo do empacotamento de partículas para obter as melhores distribuições granulométricas dos agregados incorporados nos traços do CPR, aumentando o grau de compactação da matriz quando endurecida e também melhorando o comportamento reológico e a trabalhabilidade no estado fresco. Desse modo, a pesquisa prática envolveu os seguintes ensaios normalizados para caracterização e comparação com valores disponíveis na literatura:

- a) índice de consistência na mesa de fluidez (adaptado de ASTM C1437:2013);
- b) resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2009);
- c) índice de vazios e absorção de água (ABNT NBR 9778:2009).

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco seções.

A Seção 1 apresenta a Introdução, que é composta pelos seguintes itens: conceituação e caracterização do concreto de pós reativos; objetivos da pesquisa; justificativa; e metodologia utilizada.

A Seção 2 apresenta o CPR em sua trajetória como nova tecnologia para construção civil. Apresenta uma revisão bibliográfica sobre seus materiais componentes,

métodos de empacotamento de partículas, métodos de produção atualmente empregados e propriedades anunciadas comercialmente. Desenvolve-se, também, uma discussão sobre a sustentabilidade na construção civil e seus aspectos relacionados aos CPRs, visando maiores ganhos em termos econômicos e ambientais.

A Seção 3 apresenta a parte experimental da pesquisa, através de ensaios preliminares e definição de traços de concreto de pós reativos com baixos consumos de cimento embasados nos conceitos da seção anterior. Descreve-se o processo de mistura, moldagem e cura, bem como os ensaios realizados no estado fresco e endurecido, em conformidade com normas brasileiras e internacionais vigentes.

A Seção 4 apresenta a análise dos resultados do CPR ecoeficiente obtidos no trabalho experimental, comparando com os valores de CPR comercializados e também com concretos especiais descritos na literatura. Além disso, esta comparação também abrange propriedades importantes para durabilidade de materiais compósitos (índice de vazios e absorção), considerando que o concreto estudado foi dosado de forma a atender aos requisitos da ABNT NBR 6118:2014 para a classe de agressividade ambiental mais desfavorável.

A Seção 5 relata as considerações finais obtidas e indica algumas recomendações para pesquisas posteriores.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O concreto de pós reativos se apresenta como um material compósito versátil e de propriedades inovadoras. Sua resistência e durabilidade são superiores à maioria dos materiais existentes, mas seu comportamento ainda exige estudos sobre seu desempenho em aplicações específicas. Somente com tal conhecimento este concreto pode ser inserido e considerado com a devida segurança em projetos de engenharia.

Uma característica interessante do CPR é sua suscetibilidade aos tipos de materiais disponíveis para sua produção, o que levou diversos autores a estudar a viabilidade dos CPRs utilizando materiais disponíveis locais, como Lee e Chisholm (2005) na Nova Zelândia e Allena e Newtonson (2010) na Itália. Alguns desses trabalhos e outros com o mesmo contexto estão voltados para o uso de materiais locais reciclados, inclusive para estruturas de grande porte (TUAN *et al*, 2010), evidenciando uma tendência forte do uso do CPR como uma nova opção em projetos sustentáveis. A seguir, são brevemente analisados os materiais e conceitos gerais utilizados para sua produção.

### 2.1 CONCRETO OU ARGAMASSA DE PÓS REATIVOS?

Segundo Lee e Chisholm (2005) e Repette (2005), os concretos de pós reativos, em um senso mais prático, se aproximariam mais de uma argamassa do que de um concreto devido à ausência de agregados graúdos. No entanto, os autores afirmam que, além de ser um material estrutural, os princípios que norteiam sua produção são aplicáveis as mesmas fases de produção inerentes aos concretos convencionais – de mistura, transporte, lançamento, adensamento e endurecimento. Através desse processamento similar, torna-se possível a obtenção de propriedades que são, em geral, superiores às dos próprios CADs, justificando a nomenclatura deste material compósito (concreto de pós reativos).

### 2.2 MATERIAIS

A seguir, descrevem-se os materiais tipicamente utilizados na produção dos CPRs conforme definido por Pierre e Richards (1995 *apud* ALLENA; NEWTONSON, 2010).

### 2.2.1 Cimento

Segundo Helene, Isaia e Tutikian (2011), cimentos como cimento Portland comum (CPI) e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) são os mais recomendados para utilização nos concretos de pós reativos, podendo-se utilizar outros tipos desde que sejam estudados previamente. O CP V ARI é o mais adequado por sua composição de calcário e argila na produção do clínquer, que faz com que ele reaja em maior velocidade com a água e, conseqüentemente, atinja maiores resistências num intervalo menor de tempo. Este cimento, em geral, segundo Repette (2005), tem diâmetro de 10  $\mu\text{m}$ , não devendo ser mais fino do que isso, pois aumentaria muito a demanda de água da mistura.

Os CPRs em geral utilizam grandes quantidades de cimento, mais do que 700  $\text{kg}/\text{m}^3$ , o que contribui para suas elevadas resistências. Nem todo o cimento é hidratado com a baixa relação a/c (água/cimento), o que segundo Helene, Isaia e Tutikian (2011), ajuda a evitar problemas relacionados ao calor de hidratação e problemas de fissuração.

Torna-se recomendável, portanto, uma substituição do cimento não hidratado por outros materiais tipo *fillers* ou pozolânicos.

### 2.2.2 Areia

Para concretos de elevada resistência, recomendam-se areias de quartzo, que são abundantes na natureza e com elevada dureza e resistência, além de permitir uma excelente interface pasta/agregado.

O tamanho utilizado é muito importante e, em geral, recomenda-se no máximo 700  $\mu\text{m}$  como diâmetro máximo dos grãos a serem utilizados e diâmetro mínimo de 150  $\mu\text{m}$  (REPETTE, 2005). Além disso, visando melhor empacotamento de partículas, grãos arredondados são mais adequados no caso dos CPRs.

### 2.2.3 Pó de quartzo

Assim como recomendado para as areias, estudos de Helene, Isaia e Tutikian (2005) indicam o quartzo para uso como fração fina no concreto, apresentando desempenho superior à maioria dos materiais disponíveis para britagem. É utilizado como *filler* para garantir uma boa compactação à mistura, inclusive nos concretos autoadensáveis.

O pó do quartzo tem sua propriedade realçada inclusive na etapa de cura. Segundo Richards e Cheyrezy (1995 *apud* HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011), o pó de quartzo pode fundir-se quando submetido a temperaturas acima de 200°C, apresentando reatividade e, conseqüente, potencializando as propriedades aglomerantes na matriz do concreto, o que eleva a resistência à compressão final das misturas, possibilitando ao CPR atingir faixas de resistência próximas a 800 MPa.

Segundo Repette (2005), este material deve estar numa faixa entre 5 e 20 µm. Logo, deve-se atentar à quantidade utilizada para não elevar a demanda total de água do concreto, devido à grande superfície específica deste material fino.

#### **2.2.4 Superplastificantes**

A função dos plastificantes é a de melhorar a consistência do concreto sem aumentar sua demanda de água e, conseqüentemente, melhorar suas propriedades mecânicas e sua durabilidade. Além disso, esses aditivos permitem manter a consistência da mistura quando da diminuição do volume de pasta na dosagem. Logo, é possível, mesmo com a redução de aglomerantes, manter ou até aumentar a resistência de um concreto, desde que se utilizem aditivos adequados e compatíveis com os materiais utilizados. Aspectos como abatimento, resistência e ponto de saturação deve ser estudados e, portanto, são recomendados ensaios com o Funil de Marsh (ABNT NBR 7681-2:2013) e também o ensaio de *mini slump* de Kantro (1980 *apud* RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2001).

Segundo estudos realizados por Vanderlei (2004), para os CPRs em geral, os aditivos mais indicados são os que possuem dispersantes à base de poliácrlato ou policarboxilato com uma adição por volta de 1,5 a 2,5 % em relação à massa de cimento.

#### **2.2.5 Sílica ativa**

Para obtenção de aumento da resistência e maior compacidade do concreto pode-se fazer uso de adições minerais como a sílica ativa. O emprego desta adição está vinculada, principalmente, à sua atividade pozolânica, reagindo com o hidróxido de cálcio livre, e também contribuindo para otimização da curva granulométrica da mistura (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Helene, Isaia e Tutikian (2011), as partículas de sílica ativa apresentam diâmetro em média 100 vezes menor que o dos grãos de cimento e, em geral,

recomenda-se grande utilização desse material na dosagem de concretos de alta resistência, sendo 25% em relação à massa de cimento uma estimativa adequada para atuação efetiva das reações pozolânicas.

De Larrard (1999) ainda ressalta que a granulometria da sílica ativa deve ser conhecida para efetivamente contribuir com o empacotamento de partículas de concretos especiais, porém muitas vezes são necessárias aproximações (extrapolações lineares) para completar os modelos teóricos de empacotamento.

### 2.2.6 Fibras

As fibras contribuem significativamente à resistência à tração dos CPRs, que apresentam matrizes de comportamento elástico e ruptura frágil. Sua incorporação coloca os CPRs como um dos concretos reforçados com fibra de última geração, ou UHPFRC (“*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*”).

Esta adição, em geral, é utilizada para diminuir os efeitos da microfissuração e aumentar a tenacidade do concreto, sua resistência à tração e sua energia de fratura. Essas propriedades são muito importantes e caracterizam o uso dos CPR para peças esbeltas ou também sujeitas a grandes esforços de abrasão, flexão e também devidos à retração.

Apesar disso, não foram encontrados estudos específicos que comprovem a contribuição das fibras na resistência à compressão dos CPRs, e é importante salientar que elas podem ou não ser adicionadas, dependendo de sua aplicação ou da característica a ser estudada nas matrizes ultrarresistentes dos CPR. Helene, Isaia e Tutikian (2011) apresentam, por exemplo, formulações de CPR sem fibras, podendo estas serem submetidas ou não a processos de cura térmica para aumento da resistência à compressão.

As fibras utilizadas podem ser orgânicas, poliméricas ou de aço, e segundo Helene, Isaia e Tutikian (2011) seu comprimento é da ordem de 13mm, com 0,15mm de diâmetro. Vale ressaltar a contribuição de Figueiredo (2005), que recomenda que as fibras empregadas apresentem sempre comprimento maior do que o diâmetro máximo dos agregados utilizados, devendo esta relação ser validada através de estudos também para agregados miúdos.

No caso da incorporação de fibras de aço no concreto, estas são as mais recomendadas quando o CPRs for utilizado para moldagem de elementos sujeitos a esforços de tração ou flexão, sendo as peças estruturais ou não. Segundo Repette (2005), tem-se grande majoração da ductilidade do material devido ao elevado módulo de elasticidade do aço,

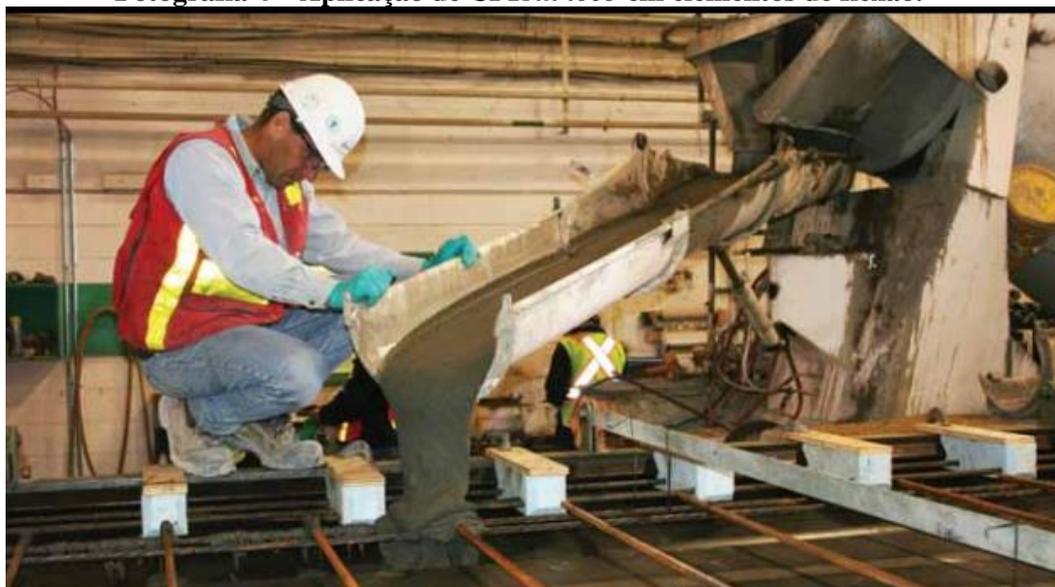
levando eventualmente à supressão de armaduras passivas em peças de concreto armado. São recomendadas elevadas quantidade de fibras metálicas, da ordem de  $155 \text{ kg/m}^3$  ou 2% do volume total de concreto.

### 2.3 CONCRETO DE PÓS REATIVOS NA ATUALIDADE

Atualmente, o CPR é mais utilizado em obras de pontes, barragens e grandes estruturas, nas quais é importante a economia no consumo de materiais. O concreto é fornecido normalmente pré-ensacado (pré-mistura dos materiais secos) em conjunto com todos os aditivos utilizáveis para realização da mistura em grandes misturadores industriais (“*pan mixers*”).

Graybeal (2011 *apud* GRAYBEAL e RUSSELL, 2013) afirma que também são possíveis aplicações para o uso de CPR moldado *in loco* e transportados inclusive em caminhões betoneira (em especial para ligações de pontes, restaurações, barragens, entre outros), desde que se garanta uma velocidade de rotação satisfatória para a mistura. Além disso, a moldagem deste concreto diretamente na obra deve ser realizada com cautela para que se mantenha a mesma qualidade que é obtida na indústria de pré-fabricados. As fotografias 4,5 e 6 demonstram as aplicações do CPR *in loco* e também sua pré-fabricação.

**Fotografia 4 – Aplicação de CPR *in loco* em elementos de flexão.**



(Fonte: GRAYBEAL, 2011)

**Fotografia 5 – Aplicação de CPR *in loco* em juntas de pontes.**



(Fonte: GRAYBEAL, 2011)

**Fotografia 6 – Transporte de lajes de CPR pré-moldadas nervuradas e pré-tracionadas para expansão de aeroporto de Haneda.**



(Fonte: BEHLOUL; BATOZ, 2009)

Abordando especificamente o traço, em geral é utilizada grande quantidade de aditivos para controlar a hidratação, pega do concreto e sua trabalhabilidade, sendo a combinação mais típica o uso de aditivos superplastificantes junto a aditivos aceleradores de pega.

Dentre as misturas referenciáveis dos concretos de pós reativos, têm-se as realizadas pelo Dr. Benjamin Graybeal, um dos maiores pesquisadores deste concreto especial, e que também estudou traços típicos patenteados no mercado, como o *Ductal*, da empresa Lafarge (GRAYBEAL; RUSSELL, 2013).

Desse modo, apresentam-se as tabelas 2 e 3, com o traço em massa de CPRs típicos disponíveis na literatura, bem como as principais características anunciadas em ficha técnica de uma de suas versões comerciais:

**Tabela 2 – Composições típicas de CPRs disponíveis na literatura.**

<b>Material</b>	<b>Ductal típico Graybeal e Russell (2013) em kg/m<sup>3</sup></b>	<b>CPR sem fibras Vanderlei e Giongo (2006) em kg/m<sup>3</sup></b>
Cimento Portland	712	874
Areia Fina	1021	962
Sílica Ativa	231	215
Pó de Quartzo	211	205
Aditivo Superplastificante	30,7	26
Aditivo Acelerador	30	-
Fibras de Aço	156	-
Água	109	157

(Fonte: elaboração própria, 2014)

**Tabela 3 – Características do Ductal® – FM Gris formulação 3GM2.0.**

<b>Características</b>	<b>Ductal – FM Gris formulação 3GM2.0</b>
Tipo de fibra	Metálica
Relação a/c (água/cimento)	0,19 ~ 0,21
Aditivo fluidificante	4 ~ 4,5%
Aditivo acelerador	0 ~ 4%
Volume de fibra	2,15%
Reologia	Fluido e “quase autoadensável”
Abatimento sem choque ao cone [ASTM C1437:2013]	170 a 260mm
Resistência à compressão (24 horas - 20°C)	> 30 MPa
Resistência à compressão (28 dias - 20°C)	>150 MPa
Resistência à compressão (com cura térmica por 48h à 90°C com U=90%)	> 180 MPa
Resistência à flexão	15 ~ 45 MPa
Densidade	2,4 ~ 2,5
Porosidade Capilar - Com tratamento térmico	0,5 ~ 0,7%
Porosidade Capilar - Sem tratamento térmico	1,2 ~ 1,6 %
Porosidade Total - Com tratamento térmico	1,9 ~ 2,8 %
Porosidade Total - Sem tratamento térmico	4,0 ~ 6,0 %

Fonte: Lafarge (2007)

## 2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Tratando-se de concretos de altas resistências, seu modo de ruptura em geral está relacionado à qualidade dos agregados, como explicam Helene, Isaia e Tutikian, (2011). Agregados britados de maiores dimensões apresentam, em geral, menores resistências, enquanto os de menor dimensão apresentam maior área superficial e necessitam de mais água para envolvê-los e gerar a consistência necessária à mistura. Sendo assim, o estudo da curva granulométrica se faz importante na composição de misturas de concreto, ainda mais no caso dos CPRs, que são mais sensíveis a variações nos seus materiais componentes.

Com o estudo adequado de empacotamento de partículas, além de se atingir maiores resistências, é possível aumentar a compacidade do concreto com o menor volume possível de vazios. O CPR deve ser o mais denso possível, de forma que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas partículas maiores. A distribuição granulométrica ótima, segundo Castro e Pandolfelli (2009), é aquela que provê o melhor empacotamento, garante maior fluidez inicial e permite uma otimização das propriedades reológicas do concreto quando no estado fresco.

Atualmente, procura-se otimizar a compacidade dos CADs com métodos práticos e normalizados como da massa unitária compactada (ABNT NM 52:2009 e ABNT NM 53:2009), de forma empírica. O procedimento inclui a mistura dos agregados em recipiente metálico de volume conhecido, para depois compactá-los com haste normalizada. Este método é interessante para se estimar a quantidade de água necessária à mistura de agregados compactados, porém, devido à grande quantidade de finos nos CPRs, este procedimento pode não funcionar corretamente. Logo, deve-se fazer uso de modelos matemáticos para prever o comportamento e a interação entre as partículas maiores e as muito finas.

A distribuição granulométrica ideal pode ser obtida através de modelos consagrados, como os propostos por Furnas, Andreassen e Alfred (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009), que hoje se tornam mais práticos e acessíveis através de ferramentas computacionais. Em geral, é possível plotar gráficos fornecendo a curva granulométrica ideal segundo modelos matemáticos e através de um coeficiente de distribuição “q”. Esta curva deve ser comparada com a curva plotada das distribuições granulométricas reais dos agregados. Ressaltasse que o coeficiente de distribuição fornece curvas que atribuem diferentes características às misturas e, no caso de dispersões de concreto fresco, duas

situações são interessantes: misturas de máxima compacidade com “q” igual a 0,37 (menor demanda de água) e misturas mais fluidas, com “q” igual a 0,22 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

É importante ressaltar que os materiais escolhidos podem ter características intrínsecas que contribuem para o melhor empacotamento e, muitas vezes, estes fatores não são incluídos nos modelos matemáticos existentes (LARRARD, 1999). O uso de aditivos superplastificantes é recomendado para evitar o contato e o atrito entre as partículas (principalmente no CPR com baixo volume de água livre), gerando uma repulsão entre todas as partículas suspensas e permitindo-as fluir livremente. As adições minerais e os agregados também podem favorecer o empacotamento de partículas se apresentarem formato esférico, pois evitam o atrito entre as partículas, além de se tornarem mais próximas das partículas teóricas utilizadas nos modelos matemáticos para previsão das dispersões.

Assim, para a produção dos CPRs ainda se realizam pesquisas em busca de ensaios normalizados internacionalmente para caracterização de agregados em frações mais finas (difratometria a laser, ensaios por sedimentação, peneiramento via úmida, entre outros), de forma a utilizá-los em conjunto com modelos de previsão de dispersões. Tais avanços podem colaborar com a eficiência do empacotamento de partículas, diminuindo o consumo de água e também de cimento necessários aos CPRs.

## 2.5 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Keller (1980, *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014), o concreto, como material de construção, tem sido importante ao longo de toda a história, e certamente será indispensável para o futuro e para as próximas gerações. Cada vez mais se torna imperativa a correta administração de recursos naturais e sua racionalização na construção civil, de forma a atender, sem desperdício, demandas específicas de habitação, infraestrutura e saneamento. Esta mudança é inevitável, e já começa a ter reflexos na economia mundial.

O concreto é um material importante para atender à demanda mundial relacionada com habitação, infraestrutura e saneamento, e sempre apresentou diversas vantagens em sua aplicação. Deve ser incentivado seu estudo para diferentes finalidades e para racionalização de sua produção, pois, como *commodity*, é a segunda mais demandada mundialmente (MEHTA; MONTEIRO, 2014), perdendo apenas para a água. Conforme a *National Ready Mixed Concrete Association* (2008), o concreto apresenta as seguintes vantagens de aplicação, trazendo ganhos de produção em escala social, ambiental e econômica:

- a) o concreto é um recurso eficiente e requer pouco processamento de seus materiais componentes;
- b) a maioria dos insumos do concreto são obtidos ou produzidos em escala local, diminuindo custos e gastos energéticos com transporte;
- c) edificações de concreto combinam insolação com alto calor específico e baixa infiltração de ar, tornando os edifícios mais eficientes energeticamente;
- d) o concreto tem longa vida útil, o que aumenta o intervalo entre manutenções e eventuais reconstruções;
- e) quando utilizado como pavimento ou revestimento externo, o concreto contribui para mitigar os efeitos de ilhas de calor nos ambientes urbanos, consequentemente diminuindo gastos energéticos com aquecimento ou resfriamento de edificações;
- f) o concreto incorpora materiais reciclados de processos industriais, como cinzas volantes, escória granulada de alto forno e sílica ativa, reduzindo energia necessária no processo, as emissões de carbono no processo produtivo e a quantidade de materiais descartados em aterros.

É importante ressaltar que um dos maiores benefícios ambientais que pode ser trazido pelo concreto está relacionado à economia de materiais na obra devido às altas resistências, à elevada vida útil e, também, à incorporação de materiais locais e reciclados. Esta combinação de fatores permite um menor impacto ambiental, sendo também muito importante a análise do ciclo de vida do concreto desde a obtenção dos insumos necessários até a demolição ou reaproveitamento da estrutura<sup>3</sup>.

Atualmente, os CADs já incorporam estes conceitos, e se apresentam como alternativa sustentável devido ao seu comportamento mecânico superior, que permite projetos inovadores com grande resistência, durabilidade e arquitetura arrojada. Segundo Levy (2005), os pilares de um edifício podem ter suas seções diminuídas em até 30 % com a utilização de altas resistências, gerando grande economia de cimento e de agregados naturais, além de lucro por aumento de áreas úteis para locação e estacionamentos. Essas reduções já são aplicadas atualmente – sendo um exemplo importante para o Brasil o CAD colorido com  $f_{ck}$  de 125MPa, utilizado no Edifício E-Tower em São Paulo, conforme registrado por Helene e Hartmann

---

<sup>3</sup> Conceito apresentado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene durante o Curso Master PEC de Sustentabilidade na Construção Civil, oferecido pelo IBRACON e SINDUSCON – SP, em 09 de setembro de 2013.

(2003). Tal conceito pode, também, ser utilizado para os CPR que, ao apresentar grande resistência à tração, permitem diminuição de dimensões de outras peças, além de pilares, gerando impacto ambiental ainda menor.

Devido ao empacotamento de partículas utilizado, à baixa relação a/c (água/cimento) e à matriz extremamente compacta do CPR, este concreto também incorpora a maioria dos conceitos de sustentabilidade, com altas resistências e durabilidade excepcional, sendo considerado praticamente nulo o ingresso de agentes corrosivos e frentes de carbonatação. Isto gera uma economia significativa em termos de retrabalhos e reforços estruturais, além de viabilizar o projeto com vida útil muito mais prolongada do que os empregados atualmente, sendo esta também uma vantagem relacionada à sustentabilidade.

De acordo com Voo e Foster (2010), os baixos consumos totais de energia e emissão de dióxido de carbono tornarão o CPR o concreto sustentável no futuro. Através do desempenho ambiental global da estrutura (análise em longo prazo), o CPR traz outros benefícios como a diminuição do consumo de energia não renovável na cadeia produtiva e o incentivo à utilização de materiais reciclados. Tais vantagens justificariam o alto consumo de cimento utilizado nos CPRs, assim como estudado por Schmidt e Teichmann (2007) e representado na Tabela 4, através de uma comparação entre o concreto convencional e o concreto de ultra alto desempenho, levando em consideração os insumos totais para realização de uma pontes protendida.

**Tabela 4 – Quantidade de materiais e energia necessária para construção de estrutura treliçada de concreto convencional e concreto de ultra alto desempenho.**

<b>Concreto</b>		<b>C25/30</b>	<b>CUAD</b>
Cimento	kg	120.000	98.000
Agregados	kg	620.000	170.000
Água	kg	60.000	21.000
Sílica ativa	kg	-	18.000
Aço (armaduras passivas)	kg	70.000	22.000
Fibras de Aço	kg	-	10.000
Aço (armaduras ativas)	kg	10.000	12.000
Energia total demanda	MJ	2.050.256	1.148.517

(Fonte: SCHMIDT; TEICHMANN, 2007)

É possível observar para a solução de ponte protendida com CPR uma redução nos insumos utilizados, devido às altas resistências à compressão da matriz do concreto e também devido à incorporação de fibras de aço adequadas. Ainda que apresente maior

consumo de cimento, segundo Schmidt e Teichmann (2007), o CPR ainda deveria ser utilizado, pois o consumo total de concreto é bem menor do que o concreto convencional para resistir aos mesmos esforços, tornando-o uma solução mais econômica e mais eficiente em termos de energia gasta na produção e também de emissões de carbono.

Boa parte dos casos de sucesso do CPR apresenta desempenho ambiental adequado conforme os conceitos descritos neste item, e que permitem a aplicação deste concreto em grandes estruturas (passarelas, pontes) e também em locais onde é possível o projeto de elementos esbeltos e nos quais se busca maior durabilidade. Faz-se cada vez mais necessária uma abordagem holística de forma a quantificar os impactos ambientais da estrutura em longo prazo e considerando a demanda total de materiais e sua durabilidade. Esta medida poderia viabilizar o uso de CPR em diferentes obras no Brasil.

Além da importância das altas resistências na redução da demanda total de materiais, é importante estudar também as emissões pontuais pelas empresas de serviços de concretagem no  $m^3$  de produto fornecido. Os concretos, em geral, apresentam emissões de  $CO_2$  em torno de 5 a 13% do valor da massa de concreto produzida (NRMCA, 2008), dependendo do traço concebido. Estes valores estão muito relacionados à clínquerização do cimento utilizado, à otimização do processo produtivo das usinas e também à quantidade de cimento por  $m^3$  calculada para os traços de concreto. Juntamente com a análise da energia total gasta para toda a estrutura, um estudo adequado e a otimização nos insumos do  $m^3$  de concreto também pode ajudar a mitigar seu impacto ambiental.

No caso da análise de 1  $m^3$  de concreto, pode-se verificar o impacto ambiental através do conceito de Rendimento, expresso pela relação resistência à compressão (MPa) / consumo de cimento ( $C_{cim}$ ). Fica evidente o fato da eficiência de um concreto estar intimamente ligada à quantidade de cimento realmente necessária para se atingir as resistências desejadas, sendo que adições como escória granulada de alto forno e cinzas volantes não devem ser incluídas, por serem subprodutos da siderurgia e de usinas termoelétricas. Para Helene, Isaia e Tutikian (2011), o rendimento tem um ponto ótimo máximo para cada traço e deve ser estudado para se obter o concreto mais sustentável, devendo esta também ser uma solução viável economicamente.

O CPR já apresenta bom desempenho ambiental global, porém, algumas das medidas descritas por Mehta (2009 *apud* SAKAI, 2010) podem ser aplicadas de forma a reduzir ainda mais o impacto ambiental e as emissões de carbono através de modificações nos materiais empregados no  $m^3$  dos concretos, a saber:

- a) redução no consumo de cimento: diminui emissões de gases estufa do concreto na fase de beneficiamento de materiais e de dosagem, tornando-o mais sustentável numa análise a curto prazo. Esta medida pode ser estudada através do rendimento do concreto (em MPa/kg de cimento);
- b) redução do consumo de aglomerantes: o uso de ligantes totais do concreto, mantendo a mesma resistência, pode ser diminuído através do empacotamento de partículas, uso de pozolanas e *fillers*, com consequente ganho na compactação da matriz e na durabilidade do concreto;
- c) redução no teor de clínquer: esta ação atua diretamente na cadeia produtiva do cimento, diminuindo a quantidade total de emissões através da substituição de parte do cimento utilizado no concreto. O cimento Portland composto (CP II) e o cimento Portland de alto forno (CP III), por exemplo, podem apresentar grandes teores de adição de material reciclado, como é o caso da escória granulada de alto forno, mantendo a mesma qualidade do produto e diminuindo as emissões advindas da clínquerização.

## 2.6 DURABILIDADE

Helene, Isaia e Tutikian (2011) observam que:

Especificamente para o material concreto, ACI 201.2R (ACI, 2001) conceitua como durável aquele que possui capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo sua forma original, qualidade e capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente de trabalho.

Um fator que influencia potencialmente as características de durabilidade do concreto é a idade da estrutura e o lugar onde a mesma foi construída. Para o concreto convencional, a ABNT NBR 6118:2014 para projeto de estruturas de concreto especifica, por exemplo, as relações a/c (água/cimento) máximas como importante fator para durabilidade, para diferentes tipos de ambientes (divididos em classes de agressividade), conforme disposto na Tabela 5.

**Tabela 5 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

(Fonte: ABNT NBR 6118:2014)

No Brasil, essa nova abordagem de durabilidade começou a ser mais difundida a partir da apresentação da Tese de Livre Docência do Prof. Dr. Paulo Helene (HELENE, 1993 *apud* HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011), a qual introduz o conceito de vida útil, citando modelos de previsão de vida útil, em geral associados ao processo de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto.

É importante ressaltar que a água (seja externa, percolando, ou em excesso no amassamento) apresenta influência em quase todos os mecanismos de degradação do concreto e deve ser sempre considerada (HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011). Ela está geralmente associada aos processos de lixiviação e de deterioração por difusão capilar de gases (névoa salina, gases sulfúricos em esgotos, entre outros). Através desses processos, ocorre uma diminuição indesejada do pH concreto, acarretando a despassivação das armaduras, o deslocamento do concreto e a perda de capacidade portante da estrutura. Logo, de forma a projetar com durabilidade, busca-se aumentar a resistência à compressão dos concretos e diminuir sua porosidade, no intuito de obter características de durabilidade semelhantes a uma rocha, frente a diversas formas de deterioração.

Segundo Perry e Seibert (2012), com o CPR é possível obter uma resistência muito superior ao concreto convencional e, também, uma durabilidade excepcional diante de agentes agressivos ao longo do tempo. Isto pode ser evidenciado nos mesmos ensaios de durabilidade realizados em concreto convencional, e tal diferença gera vantagens como baixos custos de manutenção e vida útil estendida.

Tratando especificamente da matriz, conforme estudos de Scheydt e Muller (2012), a ausência de zona de transição (ZT) e o menor teor de vazios nesse concreto o tornam praticamente imune à entrada de agentes agressivos. As espessuras de carbonatação medidas são praticamente nulas e a resistência do CPR é muito superior frente a ataques como

o da amônia, do ácido láctico e do ácido sulfúrico (FRANKE; SCHMIDT; DECKELMANN, 2008).

Além disso, o menor teor de vazios e o empacotamento de partículas do CPR, que aumentam a resistência à compressão, também influem na resistência superficial e qualidade de acabamento, tornando este concreto interessante para estruturas em concreto aparente. São mitigados os efeitos de ações de abrasão superficial, erosão, cavitação e cristalização de sais (HELENE; ISAIA; TUTIKIAN, 2011). Tais características, segundo Obata *et al.* (2008), tornam recomendável o uso deste concreto também para reforços estruturais, revestimentos externos, *whitetopping* (nova concretagem sobre pavimentos antigos deteriorados) e construção ou reforço de vertedouros com maior durabilidade.

Outra forma de degradação a ser considerada é a resistência ao fogo. Apesar do bom desempenho sob elevadas temperaturas (material refratário), as peças de concreto nem sempre resistem aos danos provocados, sujeitas a lascamento e perda de aderência com o aço, expondo a estrutura a colapsos parciais e totais, conforme Helene Isaia e Tutikian (2011). Segundo os estudos de Behloul e Acker (2004), no entanto, já existem CPRs comercializados especialmente para resistir ao fogo, com propriedades diferenciadas para módulo de elasticidade, condutividade térmica, calor específico e coeficiente de dilatação térmica, podendo suportar temperaturas entre 20 e 600 graus Celsius.

Fazendo uso de todos os conceitos abordados nesta seção, este trabalho está voltado para a ampliação do conhecimento sobre o comportamento do concreto de pós reativos, investigando suas propriedades quando da minoração no consumo de aglomerantes e da moldagem e cura aplicáveis a concretos convencionais, inclusive em meios agressivos.

### 3. ESTUDO EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS

O grande desafio na dosagem do CPR reside na ausência de um consenso técnico relacionado aos procedimentos para este tipo de concreto, fato que é representado pela ausência de normalização sobre o tema. Entretanto, já existem estudos, como a publicação de estado-da-arte realizada por Graybeal e Russell (2013) nos Estados Unidos e as recomendações japonesas feitas pela *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE, 2008) sobre dosagem, caracterização de agregados e projeto estrutural com CPR. Desta forma, para o presente estudo de dosagem experimental, tomou-se como referência conceitos de entidades consagradas (ABNT, ACI e JSCE) para a formulação do traço ecoeficiente.

Ressalta-se que neste estudo não foram utilizadas fibras, analisando a viabilidade do método de dosagem e o comportamento da matriz cimentícia ecoeficiente. Assim, para as propriedades mecânicas analisadas, o CPR ecoeficiente será ensaiado conforme normalização brasileira e comparado com estudos de outros autores que ensaiaram CPRs sob as mesmas condições (corpos-de-prova de dimensões 5 cm x 10 cm e sem fibras), assim como proposto por Vanderlei e Giongo (2006) e Reginato e Piovesan (2012).

Para propriedades relacionadas à durabilidade e trabalhabilidade dos concretos, o concreto será ensaiado conforme procedimentos de normas brasileira e americana, porém, considerando a ausência de índices específicos de durabilidade para concretos de ultra alto desempenho, serão descritos intervalos recomendados para CADs da literatura e também valores nominais de CPRs comerciais, de forma a expor uma ordem de grandeza para os valores obtidos nos ensaios.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

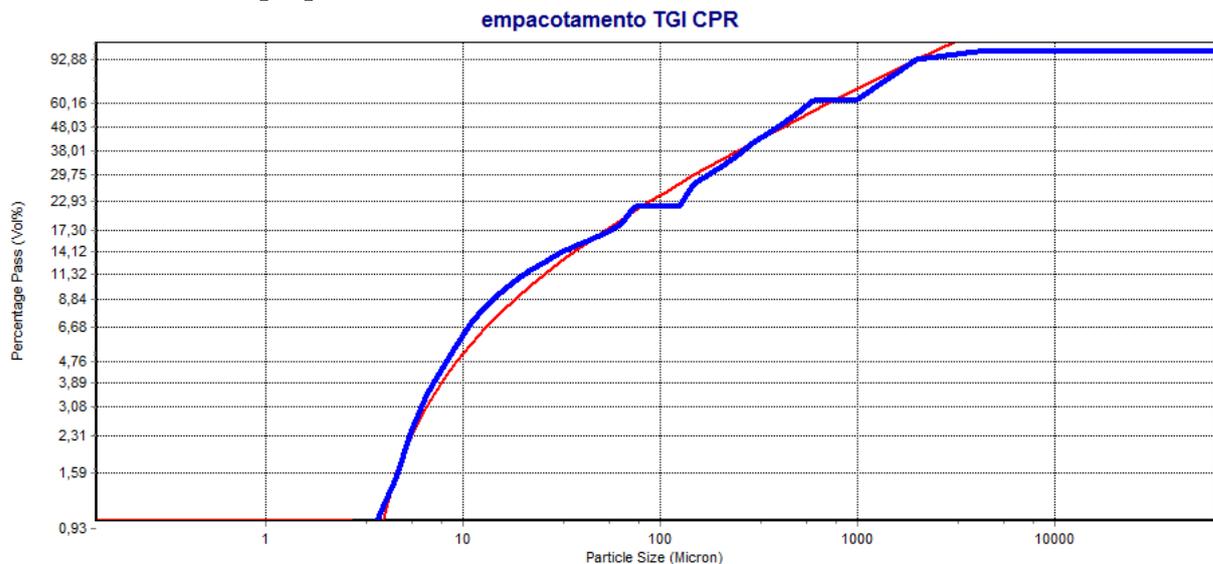
Para a dosagem dos CPRs ecoeficientes, dentre os aglomerantes, foram utilizados sacos de cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) com massa específica de 3100 kg/m<sup>3</sup>, em conjunto com sílica ativa, de massa específica 2200 kg/m<sup>3</sup>. A areia normal brasileira de origem quartzosa empregada (retida entre as peneiras n° 100 e n° 16) apresentou massa específica entre 2604 e 2650 kg/m<sup>3</sup>. O CPR foi complementado com pó de quartzo atuando como *filler*, com massa específica de 2650 kg/m<sup>3</sup>.

Além disso, foram investigados aditivos superplastificantes de base policarboxilato, de forma a identificar o produto com maior compatibilidade com os outros materiais utilizados.

### 3.2 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

O empacotamento das partículas dos materiais secos, inicialmente, foi estimado virtualmente, com o auxílio do *software* gratuito EMMA (*Elkem Materials Mixture Analyzer*), devido à ineficiência dos métodos convencionais de estimativa de massa unitária compactada para concretos com alto teor de finos. Com esta ferramenta computacional, pode-se estimar uma proporção entre os agregados, a ser utilizada nos traços de CPR e ajustada durante a dosagem, conforme demanda de água e trabalhabilidade obtidas no estado fresco. O Gráfico 2 apresenta a distribuição teórica (para coeficiente de distribuição “q” igual a 0,37) e real (obtida através da combinação da curva de distribuição dos agregados componentes).

**Gráfico 2 – Curvas real (em azul) e teórica (em vermelho) dos materiais secos para estimativa virtual do proporcionamento ideal do CPR, com auxílio do software EMMA**



(Fonte: ELKEM AS, 2012)

### 3.3 TESTES DE COMPATIBILIDADE DE ADITIVO

O aditivo utilizado no CPR deve ser escolhido de forma a garantir as maiores resistências e boa manutenção do abatimento (foram escolhidos aditivos de terceira geração à base de policarboxilatos). Assim, pôde-se avaliar qualitativamente qual o aditivo mais compatível com os materiais utilizados neste trabalho. Foi utilizado o método de *mini slump* para os ensaios com traço constante em massa de argamassa seca com muitos finos, de 1 : 2,1 : 0,9 : 0,45 [cimento : areia : pó de quartzo : água] com teor de 1,5% de superplastificante sobre a massa de cimento em cada mistura, observando unicamente o efeito do aditivo, conforme consta na Tabela 6:

Tabela 6 – Ensaio de compatibilidade de aditivos.

Aditivo Superplastificante	Índice de consistência na mesa de fluidez (ASTM C1437:2013) (mm)	Resistência à compressão aos 7 dias (ABNT NBR 5739:2009) (MPa)
Tipo A	Zero	30,6
Tipo B	266	45, 7
Tipo C	144	37,4
Tipo D	257	44, 6

(Fonte: elaboração própria, 2014)

Através do comparativo dos resultados do índice de consistência para diferentes superplastificantes, conforme sugerido por Kantro (1980 *apud* RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2001), o aditivo com maior trabalhabilidade e maior resistência aos 7 dias foi o tipo B, que foi o aditivo empregado nas dosagens experimentais.

### 3.4 DOSAGEM DE CONCRETO

Para concepção dos traços, foi utilizado o método americano de dosagem do ACI, conforme exposto por Mehta e Monteiro (2014). Apesar da ausência de agregados graúdos, o método mostrou-se eficiente e, assim, o concreto foi misturado e posteriormente ensaiado conforme normas brasileiras e internacionais aplicáveis.

Apresentam-se, a seguir, os passos para o estudo de dosagem:

- a) escolha do abatimento dependendo do tipo de obra: o abatimento fixado foi o mesmo do CPR *Ductal* de referência, com valor entre 17 e 26 cm, sem golpes na mesa de fluidez (ensaio adaptado de ASTM C1437:2013);
- b) definição do diâmetro máximo ( $D_{m\acute{a}x}$ ) dos agregados: fixou-se o diâmetro máximo como 2,4mm, conforme disponibilidade de agregados para o estudo e também a necessidade do uso de menores diâmetros para diminuir a ZT e aumentar a resistência dos CPR;
- c) definição do consumo de água relacionado com teor de vazios do concreto: o consumo de água foi definido conforme estudo do empacotamento de partículas e ajustes experimentais de reologia posteriores.
- d) estimativa da relação a/c (água/cimento) de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014 e a Classe de Agressividade Ambiental: visando a produção de um

CPR sustentável, durável e de vasta aplicabilidade, o CPR foi especificado para atender a Classe de Agressividade Ambiental IV (muito forte, em ambiente industrial ou sujeito a respingos de maré). Logo, foi adotada a máxima relação “água/materiais cimentícios” de 0,45;

- e) estimativa inicial do consumo de cimento: atendendo aos requisitos da Classe de Agressividade Ambiental IV, o consumo de materiais cimentícios mínimo especificado é de 360kg/m<sup>3</sup>.;
- f) definição dos tipos e o consumo de agregados miúdo: foram adotados agregados miúdos e pós finos em proporção definida via empacotamento virtual de partículas. O volume calculado deve completar o m<sup>3</sup> de concreto, considerando a massa específica de cada tipo de agregado miúdo;
- g) ajustes do consumo de água em relação à umidade dos agregados: os agregados devem estar secos em estufa a 24 h, evitando diminuição na água adicionada devido à umidade dos agregados;
- h) ajustes na mistura experimental: de forma a garantir as propriedades especificadas, foram dosados diversos traços, que levaram a seleção de dois traços de concreto de pós reativos ecoeficiente, dispostos na Tabela 7 (estes foram nomeados TGI A e TGI B, em alusão ao Trabalho de Graduação Interdisciplinar aqui desenvolvido pelos autores). Para definição dessas composições, foram realizadas dosagens experimentais investigando o teor adequado de aditivo superplastificante e a demanda água para garantir um índice de consistência satisfatório.

**Tabela 7 – Traços propostos de CPR ecoeficiente.**

<b>Traço</b>	<b>TGI A</b>	<b>TGI B</b>
<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Quantidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento	321	321
Sílica ativa	48	48
Superplastificante	15	22
Pó de Quartzo	353	368
Areia Quartzosa	1482	1545
Água	166	129

(Fonte: elaboração própria, 2014)

### 3.5 MISTURA, MOLDAGEM E CURA DO CPR

Os processos utilizados para a mistura, moldagem e cura dos corpos-de-prova utilizados para os ensaios de resistência e durabilidade foram baseados na norma ABNT NBR 5738:2008, para concretos convencionais, de forma a avaliar o desempenho do CPR ecoeficiente, sem a utilização de técnicas de compactação e cura térmica.

Inicialmente, foram pesadas e separadas as quantidades necessárias de materiais. Esta fase é muito importante para o CPR, que apresenta muita sensibilidade à variação dos materiais e procedimentos de dosagem. Em especial, as recomendações da JSCE (2008) limitam os desvios máximos de pesagem em 1% para cimento, água e fibras, 2% para adições minerais e 3% para aditivos e agregados.

Utilizando uma argamassadeira estacionária de eixo vertical, foi realizada a mistura mecânica de todos os pós em velocidade baixa ( $140 \pm 5$  rpm) até que se obtivesse uma mistura homogênea. Após este processo, adicionou-se a água e o aditivo de forma gradativa, até se obter uma mistura com aspecto plástico ainda em velocidade baixa. Após esta fase, foi aumentada a velocidade da mistura ( $285 \pm 10$  rpm) por 5 minutos.

Para a moldagem, as fôrmas foram revestidas internamente com desmoldante, em quantidade suficiente para possibilitar a desforma dos corpos-de-prova (CP) sem danos aos mesmos, principalmente bolhas superficiais. A moldagem dos CPs ocorreu imediatamente após o término da mistura. A colocação da argamassa nas fôrmas foi realizada em velocidade constante e ininterruptamente, devido à grande fluidez do concreto. Após o término do preenchimento da fôrma e extravasamento, retirou-se o excesso de massa em seu topo.

Para o processo de cura, logo após a moldagem dos CPs, estes foram colocados em câmara úmida à temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Sua desforma foi realizada após dois dias para posterior recolocação na câmara úmida (ressalta-se que o tempo de fim de pega foi retardado devido à grande quantidade de aditivos superplastificantes).

As fotografias 7, 8, 9 e 10 a seguir, destacam os procedimentos de mistura, moldagem e cura dos corpos-de-prova de CPR analisados neste estudo.

**Fotografia 7 – Separação dos materiais para mistura.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 8 – Mistura dos materiais em argamassadeira.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 9 – Moldagem de CPs de 5cm x 10cm.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 10 – Armazenamento de CPs moldados em câmara úmida.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

### 3.6 ENSAIO DE CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Para a determinação do índice de consistência, foi empregado o ensaio da Mesa de Consistência (*Flow Table*), adaptado da ASTM C1437:2013. Apesar de viscoso, o concreto apresenta espalhamento suficiente para dispensar golpes na mesa de fluidez, assim como nos ensaios anunciados em ficha técnica do concreto comercializado *Ductal*.

O procedimento se inicia com a limpeza do tampo da mesa e do tronco de cone com um pano úmido para o posterior preenchimento do molde de tronco de cone com o CPR fluido. Realiza-se, então, o nivelamento do topo e a retirada da fôrma com velocidade constante. São realizadas três medidas do diâmetro com o auxílio de um paquímetro, com o

qual se calcula a média dos valores, determinando o índice de consistência médio, em milímetros. As fotografias 11 e 12, a seguir, retratam o procedimento executivo deste ensaio.

**Fotografia 11 – Retirada do molde de tronco de cone para realização de ensaio de espalhamento sobre mesa de consistência.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 12 – Medição com paquímetro do espalhamento (*flow table*) dos traços propostos de CPR.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

### 3.7 ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para determinação dos valores de resistência à compressão, foi empregado o ensaio de resistência à compressão axial de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2009. Para realização do ensaio, os corpos-de-prova do CPR foram armazenados em câmara úmida até a data de ruptura (regime de cura convencional adotado para os CPRs).

Antes da ruptura, fez-se a medição do diâmetro e da altura do corpo de prova, em milímetros, com paquímetro, para se obter a relação altura/diâmetro ( $h/d$ ). O corpo de prova foi posicionado na prensa de forma que o centro de aplicação da carga coincidisse com o centro do cilindro. Após a leitura do valor da carga de ruptura, foi considerado o valor da relação dimensional  $h/d$  (altura/diâmetro) que, sendo menor do que 1,94, deve gerar um coeficiente de correção calculado através de interpolação linear, e que deve multiplicar a carga lida para obtenção da real resistência à compressão do concreto. As fotografias 13, 14 e 15, a seguir, ilustram o procedimento executivo deste ensaio.

**Fotografia 13 – Corpo de prova sendo preparado para ensaio de resistência à compressão.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 14 – Detalhe dos corpos-de-prova após ruptura cisalhada.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

**Fotografia 15 - Leitura dos valores de ruptura em tf.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

### 3.8 ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO - DURABILIDADE

Para a obtenção dos valores de índices de vazios e absorção d'água foram utilizados os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 9778:2009. Na realização desse ensaio, foram utilizados CPs com idade de 28 dias, submetidos a processo de cura úmida. Inicialmente, foi realizada a secagem de cada amostra em estufa e registrada a massa seca em gramas ( $M_s$ ). Na segunda etapa, procedeu-se a saturação das amostras, para determinação de sua massa na condição saturada ( $M_{sat}$ ) e também imersa em água após fervura durante 5 horas ( $M_i$ ).

Para o cálculo da absorção foi utilizada a seguinte Equação 1:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (1)$$

Já no cálculo do índice de vazios, foi utilizada a Equação 2:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100\% \quad (2)$$

A balança hidrostática utilizada na pesagem das amostras imersas em água após fervura de 5 horas está ilustrada na Fotografia 16.

**Fotografia 16 – Balança hidrostática utilizada para pesagem da amostra imersa em água.**



(Fonte: acervo pessoal, 2014)

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios executados nos CPs moldados. As propriedades ensaiadas dos CPRs propostos foram resistência à compressão, índice de consistência, absorção e índice de vazios, de tal modo que possam ser comparadas com concretos semelhantes disponíveis na literatura.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RENDIMENTO

As tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resultados de resistência à compressão para os concretos ensaiados, conforme disposto no item 3.7. Foi analisada a resistência à compressão obtida com para um consumo de cimento de 321kg de cimento (369 kg de aglomerantes), atendendo aos requisitos mínimos da ABNT NBR 6118:2014 para concretos em ambientes muito agressivos. Desta forma, através de ensaios normalizados e para a idade de controle de 28 dias, os CPRs propostos apresentaram resistências acima de 90 MPa no caso do traço TGI A, e acima de 100 MPa no caso do traço TGI B.

**Tabela 8 – Resistência à compressão a 7 dias.**

		<b>Carga lida (tf)</b>	<b>Coefficiente de correção h/d (altura/diâmetro) - (ABNT NBR 5739:2009)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
TGI A	CP 21	11,80	0,986	57,8
	CP 22	12,10	0,993	59,2
TGI B	CP 31	13,50	0,980	66,0
	CP 32	13,50	0,986	66,4

(Fonte: elaboração própria, 2014)

**Tabela 9 – Resistência à compressão a 28 dias.**

		<b>Carga lida (tf)</b>	<b>Coefficiente de correção h/d (altura/diâmetro) - (ABNT NBR 5739:2009)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
TGI A	CP 27	16,45	0,986	82,8
	CP 23	18,80	0,983	91,8
	CP 30	16,81	0,986	83,1
TGI B	CP 36	21,25	0,986	104,6
	CP 34	22,00	0,991	108,8

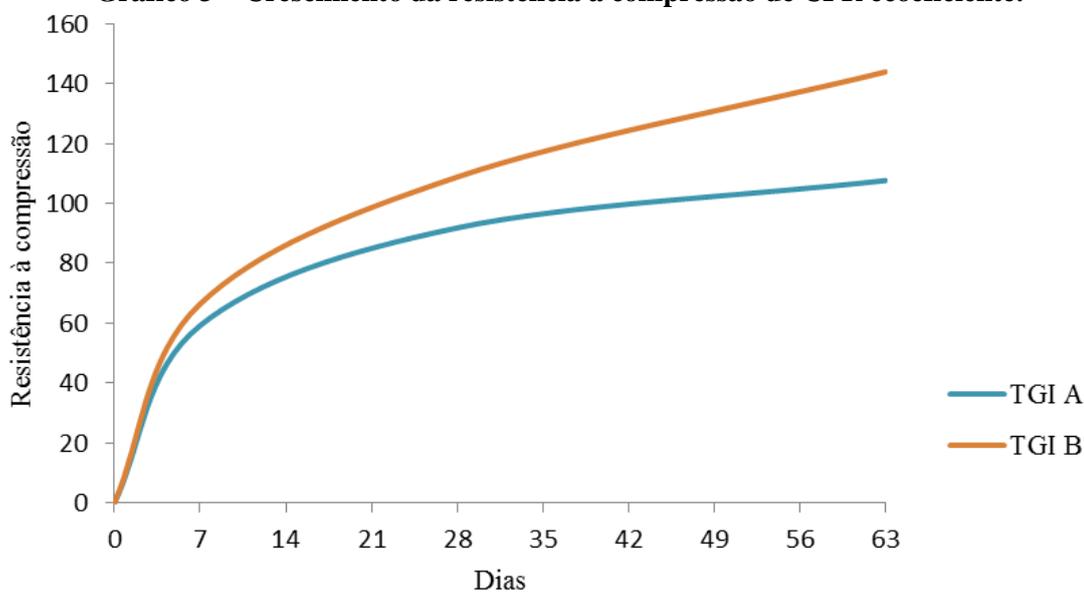
(Fonte: elaboração própria, 2014)

**Tabela 10 – Resistência à compressão a 63 dias.**

		Carga lida (tf)	Coefficiente de correção h/d (altura/diâmetro) - (ABNT NBR 5739:2009)	Resistência à compressão (MPa)
TGI A	CP 29	21,50	0,983	107,4
	CP 24	21,40	0,987	107,6
TGI B	CP 35	28,90	0,985	143,9
	CP 40	28,50	0,982	141,4

(Fonte: elaboração própria, 2014)

O Gráfico 3 evidencia o desempenho mecânico obtido com os CPRs ecoeficientes, sendo que neste também foi possível notar um retardamento no crescimento da resistência do traço TGI B, apresentando uma taxa de crescimento de 32% de 7 dias para 28 dias de idade. Este traço obteve maiores resistências à compressão em curto e em longo prazo, sendo importante ressaltar que o menor consumo de água e a maior dosagem de aditivo superplastificante utilizada podem ter contribuído para justificar tal comportamento.

**Gráfico 3 – Crescimento da resistência à compressão de CPR ecoeficiente.**

(Fonte: elaboração própria, 2014)

Já Tabela 11 apresenta a resistência à compressão do CPR ecoeficiente comparada a valores de pesquisas recentes realizadas sob as mesmas condições. Assim, foram computados valores de CPs cilíndricos moldados sem fibras e com dimensões de 5 cm x 10 cm. Pôde-se avaliar comparativamente a eficiência dos métodos utilizados para otimização da matriz cimentícia dos CPRs, que permitiram a elaboração de traços com resistências à

compressão acima de 140MPa aos 63 dias de idade. Numa análise aos 28 dias, os traços propostos mostraram altas resistências, mas inferiores aos valores de referência, sendo atribuída tal diferença à ausência de cura térmica e ao conteúdo reduzido de ligantes no concreto.

**Tabela 11 – Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm de CPRs moldados sem fibras (valores em MPa).**

	<b>CPR</b>	<b>Cura Térmica</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>63 dias</b>
1	Reginato e Piovesan (2012)	Sim	173,5	182,7	-
2	Reginato e Piovesan (2012)	Não	112,9	136,5	-
3	Vanderlei e Giongo (2006)	Sim	178,0	183,0	-
4	Vanderlei e Giongo (2006)	Não	105,0	165,0	-
5	TGI A	Não	59,2	91,8	107,6
6	TGI B	Não	66,4	108,8	143,9

(Fonte: elaboração própria, 2014)

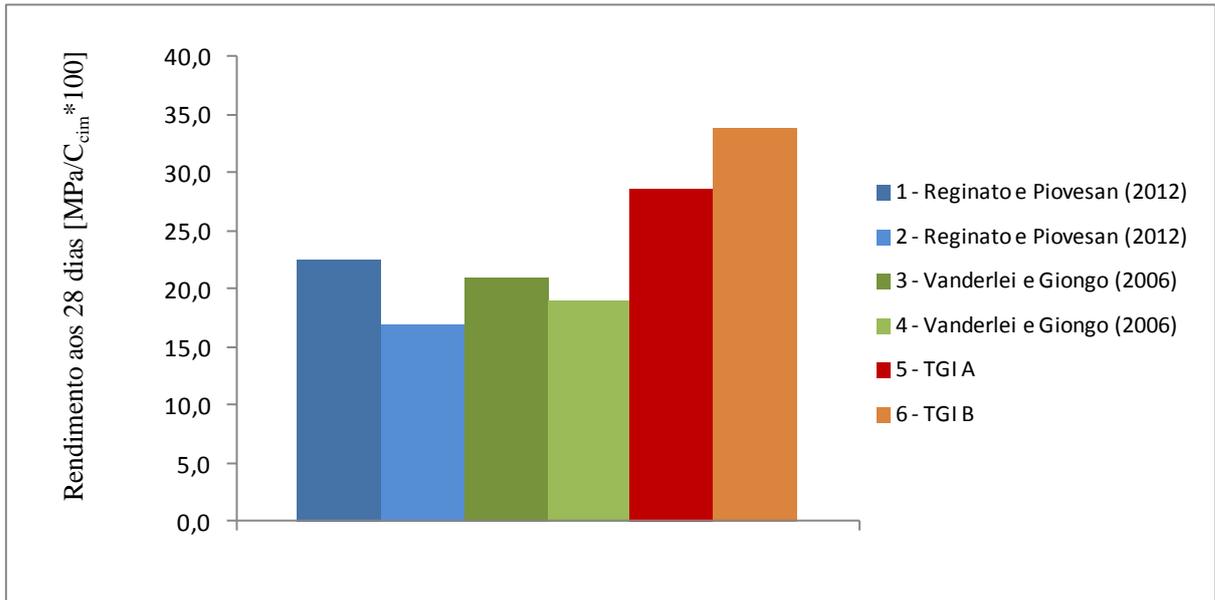
Para estes mesmos concretos, de modo a estudar vantagens em termos ambientais e econômicos obtidas com o CPR adaptado, são analisados na Tabela 12 e, no Gráficos 4, os rendimentos (relativos ao consumo de cimento) dos concretos propostos e dos valores de referência, todos ensaiados aos 28 dias de idade e sem fibras. Com um consumo de cimento de 321kg por m<sup>3</sup>, os CPRs ecoeficientes apresentaram rendimentos de até 0,339 MPa por quilo de cimento, e mostraram-se superiores aos rendimentos de todos os concretos de referência (com e sem cura térmica). Tal diferença deve-se, em parte, à aplicação do adequado empacotamento de partículas, admitido virtualmente, em conjunto com o uso do aditivo superplastificante compatível com o cimento e materiais secos empregados.

**Tabela 12 – Comparativo de rendimento a 28 dias de CPRs relativo ao consumo de cimento.**

	<b>CPR</b>	<b>C<sub>cim</sub>/m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MPa/C<sub>cim</sub> * 100 (28dias)</b>	<b>MPa/C<sub>cim</sub> * 100 (63dias)</b>
1	Reginato e Piovesan (2012)	808	22,6	-
2	Reginato e Piovesan (2012)	808	16,9	-
3	Vanderlei e Giongo (2006)	874	20,9	-
4	Vanderlei e Giongo (2006)	874	18,9	-
5	TGI A	321	28,6	33,5
6	TGI B	321	33,9	44,8

(Fonte: elaboração própria, 2014)

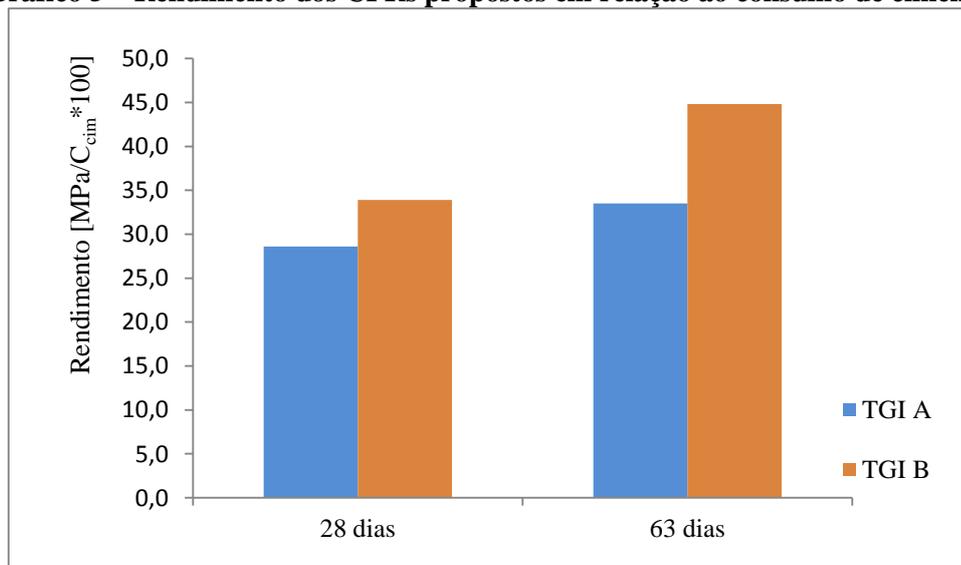
**Gráfico 4 - Comparativo de rendimento de CPRs em relação ao consumo de cimento.**



(Fonte: elaboração própria, 2014)

É importante destacar também que, ainda que a comparação de rendimentos em idades posteriores não tenha sido possível, a resistência à compressão e o rendimento dos CPRs ecoeficientes continuaram aumentando com o tempo conforme o Gráfico 5, sendo este um comportamento favorável à sustentabilidade. Com maior resistência adquirida após dois meses, o CPR proposto apresenta potencial ainda maior para redução de sessões transversais e também de e de energia para produção.

**Gráfico 5 – Rendimento dos CPRs propostos em relação ao consumo de cimento.**



(Fonte: elaboração própria, 2014)

#### 4.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NA MESA DE FLUIDEZ

Ainda no estado fresco, os CPRs foram submetidos a ensaios de consistência na mesa de fluidez. Foi utilizado como referência, o concreto Ductal® – FM Gris formulação 3GM2.0, de consistência “quase autoadensável” e com abatimento entre 17 e 26 cm, conforme disposto no item 2.3 deste trabalho. Os CPRs ecoeficientes foram submetidos ao mesmo ensaio adaptado da ASTM C 1437:2013, e apresentaram reologia semelhante à do concreto comercial, sendo que, no caso do traço TGI B, obtiveram-se resultados acima do intervalo de referência, conforme Tabela 13.

**Tabela 13 – Índice de consistência dos traços de concreto estudados.**

<b>TGI A</b>	<b>TGI B</b>
25,77 cm	28,63 cm
25,68 cm	27,93 cm
25,54 cm	28,71 cm
Média = 25,66 cm	Média = 28,42 cm

(Fonte: elaboração própria, 2014)

#### 4.3 DURABILIDADE

Através dos ensaios realizados de acordo com ABNT NBR 9778:2009, foram analisadas propriedades pertinentes à durabilidade do concreto no estado endurecido, incluindo o índice de vazios e a absorção de água. Seus valores permitiram classificar a qualidade do concreto através de índices de durabilidade disponíveis na literatura.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos para absorção de água e índice de vazios aos 28 dias de amostras após imersão e fervura dos CPRs ecoeficientes propostos. Os traços TGI A e TGI B apresentaram absorção de 1,0% e 0,6%, respectivamente, e índice de vazios de 2,6% e 1,5%, respectivamente.

**Tabela 14 – Resultados de absorção de água e índice de vazios aos 28 dias (ABNT NBR 9778:2009).**

<b>TGI estudado</b>	<b>Nº do CP</b>	<b>Absorção (Msat -Ms)/Ms [%]</b>	<b>Índice de vazios (Msat-Ms)/(Msat- Mi) [%]</b>
TGI A	CP 24	0,945	2,414
	CP 29	1,130	2,831
<b>Média TGI A</b>		<b>1,037</b>	<b>2,623</b>
TGI B	CP 35	0,583	1,458
	CP 40	0,596	1,500
	CP 33	0,635	1,597
<b>Média TGI B</b>		<b>0,605</b>	<b>1,518</b>

(Fonte: elaboração própria, 2014)

Foi observado que o traço TGI B, com relação a/agl (água/aglomerante) de 0,35, obteve matriz cimentícia mais compacta e com menor volume de poros permeáveis que o traço TGI A, com relação a/agl de 0,45 (sendo este o limite especificado pela ABNT NBR 6118:2014 para classe de maior agressividade ambiental). Através dos ensaios realizados, notou-se que ambos os concretos ecoeficientes superaram requisitos de durabilidade para concretos de boa qualidade disponíveis na literatura. Para concretos de alto desempenho, em termos de absorção, Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) recomendam absorção entre 2% e 5%, enquanto Whiting e Nagi (1998) indicam um índice de vazios próximo de 6% como adequado para concretos duráveis e resistentes.

## 5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos estabelecidos para este trabalho, foi possível recomendar composições de concretos de pós reativos com baixo consumo de aglomerantes e com métodos de cura convencionais. Através do método proposto, foram atingidas resistências à compressão acima de 100 MPa aos 28 dias e acima de 140 MPa aos 63 dias de idade, não sendo possível atingir o patamar teórico de 150 MPa que, em geral, está relacionado a complexos processos de compactação e cura térmica dos concretos de ultra alto desempenho.

A dosagem dos CPRs ecoeficientes foi baseada nas etapas propostas pelo método ACI (MEHTA; MONTEIRO, 2014), em conjunto com ensaios de compatibilidade de aditivos e empacotamento de partículas via *software* computacional. As ferramentas utilizadas neste trabalho permitiram a obtenção de concretos adaptados, com 321 kg/m<sup>3</sup> de cimento (369kg/m<sup>3</sup> de aglomerantes) e com rendimentos muito superiores aos de CPRs disponíveis na literatura. Este desempenho pode vir a dispensar o uso de compactação e cura térmica para algumas aplicações deste concreto, tanto *in loco* como em indústrias de pré-fabricados. Entretanto, ressalta-se que o controle tecnológico do concreto, a racionalização e o monitoramento dos processos de produção devem ser incentivados.

Além disso, os traços estudados foram ensaiados para investigação de características relacionadas à durabilidade, atendendo satisfatoriamente requisitos normativos brasileiros e recomendações internacionais sobre quantidade mínima de cimento por m<sup>3</sup>, absorção de água, e índice de vazios, o que pode vir contribuir futuramente para aplicações específicas em obras sob ambientes agressivos ou projetadas para longa vida útil.

Considerando suas altas resistências, sua variabilidade para diferentes tipos de materiais e também o potencial para redução de emissões de carbono, pesquisas futuras devem abordar as diferentes propriedades mecânicas dos CPRs, estudos de dosagem com grandes misturadores, a influência de diferentes tipos de fibras, e também métodos de ensaio e de controle tecnológico.

Sendo um concreto de última geração, este pode ser uma alternativa para inovação em projetos arquitetônicos e estruturais mais ousados inclusive no Brasil, fazendo uso do grande desempenho mecânico desse material, que tem potencial para se tornar ainda mais sustentável e influenciar um mercado que cada dia mais se organiza em busca da economia de recursos naturais e da otimização de processos produtivos.

## REFERÊNCIAS

- ALLENA, Srinivas; NEWTON, Craig M. **Ultra High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials**. Trabalho apresentado no 2010 Concrete Sustainability Conference, Dubai, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 1437**: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Emenda 1. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-2**: calda de cimento para injeção. Parte 2: determinação do índice de fluidez e da vida útil – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Uruguai, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53**: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Uruguai, 2009.
- BEHLOUL, M.; ACKER, P. **Ductal® Technology: a Large Spectrum of Properties, a Wide Range of Applications**. Trabalho publicado no International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Alemanha, set. 2004. Cap.1 p. 11.
- BEHLOUL, M.; BATOZ, J. **UHPFRC development on the last two decades: an overview**. Trabalho apresentado na UHPFRC 2009. Marselha, 2009.
- CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partícula para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. São Paulo, 2009. n. 55. p. 18-32.
- DAMINELLI, Bruno L.; PILEGGI, Rafael G.; AGOPYAN, Vahan.; JOHN, Varnderley M. **Mitigating CO2 Emissions from the cement industry**: potential of feasibility versus the

market challenge. 2013. Trabalho apresentado no CIB 2013 Worl Congress, Brisbane, Australia, 2013.

ELKEM AS. **Material Mix Analyzer (EMMA)**. Elkem AS, 2012.

FÁVERO, Rafael B.; TUTIKIAN, Bernardo F. Contribuição para o estudo de Concreto de Pós Reativos com aplicação de diferentes níveis de pressão confinante no estado fresco. **Engenharia Civil**. Braga, 2013. n. 45. p. 37-49.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap 39.

FRANKE, Lutz; SCHMIDT, Holger.; DECKELMANN, Gernod . **Behaviour of ultra high-performance concrete with respect to chemical attack**. Trabalho publicado no Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, 2008.

GRAYBEAL, Ben. **Ultra-High Performance Concrete**. N. FHWA-HRT-11-038, McLean, 2011

GRAYBEAL, B.; RUSSELL, H. **Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community**. N. FHWA-HRT-13-060, McLean, 2013.

HELENE, P; ISAIA, G.C; TUTIKIAN, B.F. Concreto de Alto e Ultra Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, Cap 36, 2011.

HELENE, Paulo; HARTMANN, Carine T. Edifício e-Tower: Record mundial en el uso de hormigón coloreado de altas prestaciones. **Ingenieria Estructural**. 2003. v.11, p.11 - 18.

JAPAN SOCIETY OS CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)**. Concrete Engineering Series 82. 2008.

KOSMATKA, Steven H.; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William C. High-Performance Concrete. In: **Design and Control of Concrete Mixtures, EB001**, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.

LAFARGE. **Aplicação de painéis pré-moldados no estádio Jean Bouin na França**. Disponível em: [http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/3\\_6\\_1-Detail?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib\\_ductal/Site\\_ductal/AllKeyProject/KeyProjectDuctal%2520Page\\_1385395657489/Content%2520KeyProjectDuctal](http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/3_6_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_ductal/Site_ductal/AllKeyProject/KeyProjectDuctal%2520Page_1385395657489/Content%2520KeyProjectDuctal) Acesso em 01 out 2014.

LAFARGE. **Fiche de caractéristiques techniques: Ductal-FMGriseFeu\_3GM2.0F**, França, revisão n. 2, 2007. Disponível em: <[http://www.ductal-lafarge.com/FichetechniqueDuctal-FMGriseFeu\\_3GM2.0F.pdf](http://www.ductal-lafarge.com/FichetechniqueDuctal-FMGriseFeu_3GM2.0F.pdf)>. Acesso em 15 mai 2014.

LARRARD, F. de. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. New York: CRC Press, 1999.

LEE, N. P.; CHISHOLM, D. H. **Reactive Powder Concrete**. Study Report SR 146. Judgeford: BRANZ, 2005.

LEVY, S. Sustentabilidade na Construção Civil: A Contribuição do Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap 50.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Concrete CO2 Fact Sheet**. NRMCA, Silver Spring, n. 2, 2008.

NEVILLE, Adam M. **Concrete: Neville's Insights and Issues**. London, 2006.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OBATA, Hiroyuki.; NISHIZAWA, Tatsuo.; SASAKI, Iwao.; KATAGIRI, Makoto. **Structural Bond: Effect of Improved Interfacial Bond on Whitetopping Using Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete**. Trabalho Apresentado no 2º International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2008, p. 243

OLIVEIRA, I. R. de; Studart, A. R.; Pileggi, R. G.; Pandolfelli, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

PERRY, Vic; SEIBERT, Peter. **Field cast UHPC Connections for Precast Bridge Elements and Systems**. 2012. Trabalho apresentado ao 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 2012.

RAMACHANDRAN, V.S.; BEAUDOIN, James J. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications**. Building Materials Series. 2001.

REGINATO, Lucas Alexandre; PIOVESAN, Angela Zamboni. **Emprego do modelo teórico de empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós reativos e análise das propriedades mecânicas**. 2012. Trabalho apresentado ao SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS, Fortaleza, 2012.

REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, Cap 49, 2005.

SAKAI, Koji. **Concrete and Sustainability**. In: Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy. University of Wisconsin Milwaukee Centre, 2010.

SCHEYDT, Jennifer C.; MUELLER, Harald S. **Durability: Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact in Durability**. Trabalho Apresentado no 3º International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Kassel, 2012, pag 349

SCHMIDT; Michael; TEICHMANN, Thomas. **Ultra-high-performance concrete: Basis for sustainable structures.** 2007. Trabalho apresentado ao Central Europe towards Sustainable Building Prague, Alemanha, 2007.

TANG, M. C. **High Performance Concrete: Past, Present and Future.** Trabalho publicado no International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Alemanha, set. 2004. Cap.1 p. 3.

TUAN, N. V.; HANH, P. H.; THANH, L. T.; GUANG, Y.; SOUTSOS, M. N.; GOODIER, C. I. **Ultra High Performance Concrete Using Waste Materials for High-Rise Buildings.** Trabalho apresentado em CIGOS-2010, Paris, 2010.

VANDERLEI, Romel D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** 2004. 168 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VANDERLEI, Romel D.; GIONGO, José S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 33, p. 115-148, 2006

VOO, Yen L.; FOSTER, Stephen J. Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction. **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering.** London, 2010. v. 3, n. 3, p. 168–187.

WHITING, D. A; NAGI, M. A. **Manual on Control of Air Content in Concrete.** EB116. National Ready Mixed Concrete Association and Portland Cement Association. 1998.